Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde

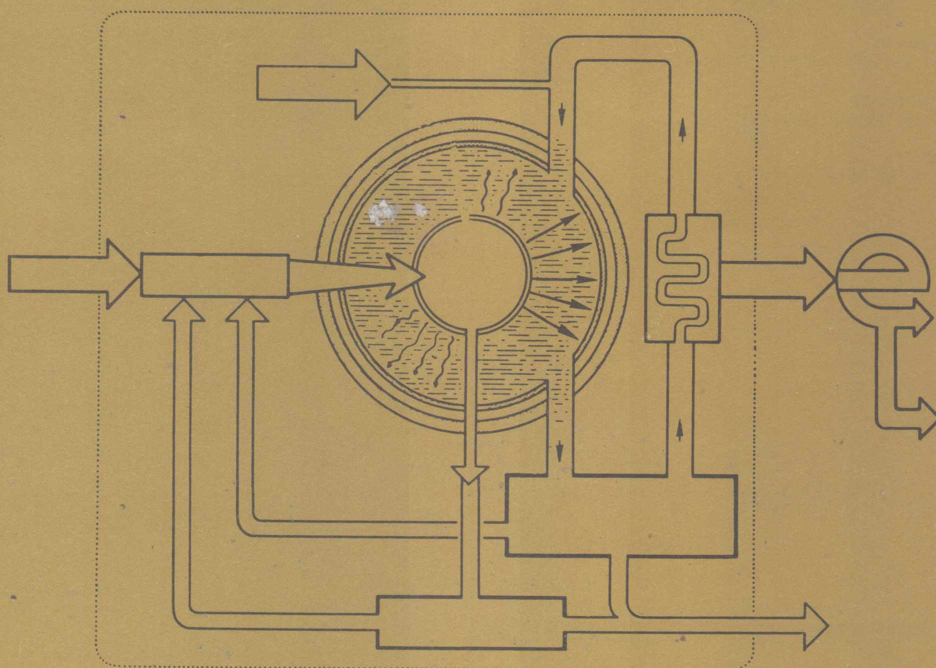
Uitgave van de
Nederlandse Natuurkundige Vereniging

NNV

Inhoud

A53(2/3)1987

Kernenergie



Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde

Uitgave van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging NNV

Jaargang A 53 (2/3) 1987

Redactiesecretariaat
drs. J.W. Miltenburg
THE, N-laag 246
postbus 513, (5600 MB) Eindhoven
telefoon 040-47 42 88

Produktie en advertenties:
Bureau NNV
Postbus 5451, 1007 AL Amsterdam
Tel. 020-73 97 77, telex WISRA NL 17141, c/o NNV

Abonnementen:
Nederlandse Natuurkundige Vereniging,
Postbus 5451, 1007 AL Amsterdam, tel. 020-739777.
De administratie behandelt alle zaken betreffende het lidmaatschap van de NNV, abonnementen op het NTvN, evenals alle betalingen.
Het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde-A verschijnt viermaal per jaar en is hoofdzakelijk bestemd voor korte overzichtsartikelen, die van belang kunnen zijn voor een in de fysica geïnteresseerde lezerskring.
Actuele informatie op natuurkundig en hiermee samenhangend maatschappelijk gebied, verenigingsnieuws en verdere mededelingen aan de Nederlandse natuurkundigen worden gegeven in het veertiendaagse tijdschrift NTvN-B.
Beide tijdschriften worden uitgegeven door de Nederlandse Natuurkundige Vereniging en toegezonden aan haar leden.
De contributie van de NNV bedraagt bij gewoon lidmaatschap *f* 108,—; voor leden van de KNCV, het KIvI, de NAC, NVON, de Belg. Nat. Ver. of het KNGMG *f* 88,—; voor studenten, militairen en huisgenoten *f* 38,—; voor afgestudeerden gedurende 4 jaar na het afstuderen en voor gepensioneerden *f* 58,—.
Losse abonnementen op het NTvN kunnen worden genomen bij de administratie van de NNV.
Abonnementsprijs *f* 100,— (buitenland *f* 106,—).
Losse nummers NTvN-A *f* 15,—; dubbele nrs. *f* 25,—.

Zetwerk:
Pecasse Intercontinental, Maastricht

Vormgeving:
Studio Obertop, Zoetermeer

Druk:
Samsom Sijthoff, Alphen a.d. Rijn

Op de voorpagina: Fusiereactor

Na de Brede Maatschappelijke Discussie hebben enkele naïevelingen gedacht, dat het praten afgelopen was en de politieke keuzen gemaakt konden worden. Er leek een meerderheid tegen uitbreiding van kernenergie te zijn, zij het om uiteenlopende redenen. De regering bereidde desalniettemin een beslissing voor die, naar viel te vermoeden, in de richting van een nieuwe kerncentrale tendeerde. Intussen is veel aandacht gegeven aan kolencentrales en wordt er hard gewerkt aan ontzwaveling. Bij de centrale Amer 8 van de PNEM is zo'n installatie in aanbouw. Voorlopig wordt nog verdere uitbreiding gegeven aan het geïnstalleerd vermogen van kolencentrales. Maar daarvan zijn de grenzen ook in zicht. Niet dat de kolenreserves ontoereikend zouden zijn. De grenzen worden gesteld door de productie van vliegas en de NO_x-uitstoot. Door verbeteringen aan de ketel denkt men die NO_x-uitstoot nog wel te verminderen, maar een echte oplossing ervan is nog niet in zicht. Voor de vliegas is nu nog een markt in de cementindustrie. Ook daar kleven echter bezwaren aan, terwijl bovendien die markt verzadigingsverschijnselen begint te vertonen. Ons land verkeert trouwens toch in een wat paradoxale situatie: we voeren veel kolen in en aardgas uit. We ruilen dus een relatief schone brandstof tegen een relatief vuile.
Juist op het moment dat de regering tot conclusies dreigde te komen voltrok zich de ramp van Tsjernobyl, en milde radioactieve buitjes vielen her en der in Europa. Het onvoorstelbare was toch een keer gebeurd, en hoe precies kunt u in dit nummer lezen. Nu, een jaar na Tsjernobyl, komt het dilemma weer in zijn volle omvang opzetten. Wind- en zonneënergie lijken slechts oplossingen voor kleinschalige toepassing. Zuinigheid of zelfs bezuiniging van energiegebruik lijken zich weer slecht te verdragen met het welvaartsniveau waarop wij gewend zijn ons te bewegen. Aanwending van conventionele opwekkingsmethoden leidt tot milieuproblemen die onoverkomelijk lijken, terwijl kernenergie door althans de Nederlandse bevolking wordt afgewezen. De redactie vond het daarom zinvol om eens een nummer te wijden aan deze omstreden vorm van energieopwekking. Verschillende aspecten van de zaak worden door deskundigen toegelicht, terwijl wij ook een aantal fysici en technici naar hun persoonlijke opinie hebben gevraagd. De redactie is zelf niet van een bepaald standpunt uitgegaan. Enerzijds willen wij een stuk objectief bedoelde informatie verschaffen, anderzijds u een idee geven van de meningen van mensen die geacht moeten worden beter geïnformeerd te zijn dan de gemiddelde burger. U moet zelf maar uitmaken of wij in onze opzet zijn geslaagd. Uw speciale aandacht willen wij nog vragen voor de bijdrage van Kistemaker. Men heeft Kistemaker nooit kunnen verwijten dat het hem aan fantasie ontbrak, en dat verwijt blijkt hem nog steeds niet te treffen.

Frans Sluijter

Het Energieonderzoek Centrum Nederland

J. Bergsma

Het Energieonderzoek Centrum Nederland te Petten is het centrale instituut in Nederland voor onderzoek op het gebied van opwekking en gebruik van energie en daarmee gelieerde milieuaspecten. De nadruk ligt daarbij op problematiek op middellange en lange termijn. Daarnaast verleent het ECN diensten buiten het energiegebied ten behoeve van overheid, bedrijfsleven en wetenschappelijk onderwijs.

De stichting heeft ruim 850 medewerkers. Zij houden zich bezig met werkzaamheden die variëren van fundamenteel onderzoek en technologisch-wetenschappelijk ontwikkelingswerk tot het uitvoeren van gespecialiseerde diensten. Belangrijke werkgebieden zijn daarbij nucleaire technologie, studie van risico's en veiligheid, met energie gelieerd milieuonderzoek, technologie van windenergie, technologie van brandstofcellen, onderzoek van keramiek en katalysatoren alsook informatica.

In 1955 werd de stichting Reactor Centrum Nederland opgericht. Deze werd gesteund door de ministeries van Economische Zaken en van Onderwijs en Wetenschappen, door FOM en door een aantal grote bedrijven in Nederland. De taakstelling was gelegen in de bevordering van het vreedzame gebruik van kernenergie. De doelgroepen waren de bedrijven voor energie-opwekking, het daarbij betrokken bedrijfsleven, de overheid (in verband met advisering) en de instellingen voor hoger onderwijs. Aan de uitvoering van deze taakstelling werd gestalte gegeven door enerzijds het voortzetten van een eerder begonnen samenwerking met Noorwegen en anderzijds het installeren van een hoge-fluxreactor (HFR) te Petten en het inrichten van een onderzoekcentrum daarbij, *fig. 1*. Een afzonderlijke ontwikkeling in Den Haag van een afdeling voor ontwerp en beoordeling van reactoren werd later ook naar Petten overgebracht. De ultracentrifuge voor uraniumverrijking werd, voortbouwend op binnen FOM verricht onderzoek, door het ECN in Amsterdam ontwikkeld bij wat later AMOLF werd. Dit project heeft geleid tot het totstandkomen van UCN in Almelo.

In het midden van de jaren zeventig werd de taakstelling verbreed naar ook andere vormen van energie dan kernenergie, hetgeen gepaard ging met een verandering van de naam in de huidige. Het nucleaire onderzoek werd meer gericht op risico's en veiligheid, milieuaspecten, afvalverwerking en kernfusie. Nieuw onderzoek betrof windenergie, steenkool en materialen. Ten behoeve daarvan werden nieuwe faciliteiten geïnstalleerd, zoals een windturbine met een diameter van 25 m en van 300 kW alsmede een ketel voor wervelbedverbranding van poederkool.



Fig. 1. De ECN-laboratoria in het duinterrein nabij Petten. Op de voorgrond links is te zien de 300 kW windturbine en rechts het testveld voor windturbines. Op de achtergrond liggen de laboratoria van het Gemeenschappelijk Centrum voor Onderzoek van de Europese Commissie met daarbij de hoge-fluxreactor (HFR). Daar vóór in het midden het cyclotron en laboratoria van Mallinckrodt Diagnostica en geheel rechtsachter de opslagloodsen voor radioactief afval van de COVRA.

Als gevolg van opgelegde bezuinigingen vond in 1984 een nieuwe heroriëntatie plaats, gepaard gaande met een aanzienlijke afslanking. Dit heeft geleid tot een nieuwe strategische planning op hoofdgebieden in de zin als hierboven werd aangegeven en met een financiering die naast een basissubsidie voornamelijk bestaat uit doelsubsidies en inkomsten uit opdrachten. In het kader van deze heroriëntatie van onderzoek paste de inrichting van het Nationaal Keramisch Atelier. Dit heeft ten doel de fabricage van keramische vormstukken op basis van oxidische en niet-oxidische composietmaterialen. Voorts werd aan het ECN de leiding opgedragen van het Nationale Onderzoekprogramma Brandstofcellen. Daarbij gaat het om een milieuvriendelijke techniek van energieconversie.

Overeenkomstig thans geldende gedachten is het ECN geleidelijk omgezet van een onderzoekinstituut voornamelijk gebonden aan het ministerie van Economische Zaken, naar een zogeheten Groot Technologisch Instituut. Het staat ten dienste van overheid en bedrijfsleven en werkt nauw samen met het wetenschappelijk onderwijs. Strategie en programmakeuze worden meer en meer bepaald door een visie op de behoeften van gekozen doelgroepen. De belangrijkste opdrachtgevers vanuit de overheid zijn de ministeries van Economische Zaken, van Volkshuisvesting, Ruimtelijke Ordening en Milieu en van Sociale Zaken.

Het ECN is georganiseerd volgens een matrixstructuur met daarin vier onderzoekafdelingen, t.w. Chemie-Materiaalkunde, Energietechnologie, Fysica en het Energiestudiecentrum (ESC) alsmede een aantal technische en infrastructurele diensten. Programmatisch worden onderzoek en ontwikkeling gestuurd volgens de indeling:
- nucleair onderzoek,
- fossiele energiedragers en gelieerd milieuonderzoek,
- stromingsenergie,
- energiestudies,
- materiaalonderzoek,
- computergebruik en informatica,
- onderzoek met neutronen.

In ieder van deze programmagebieden is het onderzoek ingedeeld in projecten, die worden uitgevoerd in een of meer van de genoemde afdelingen en diensten.

Het fysische onderzoek bij ECN vloeit

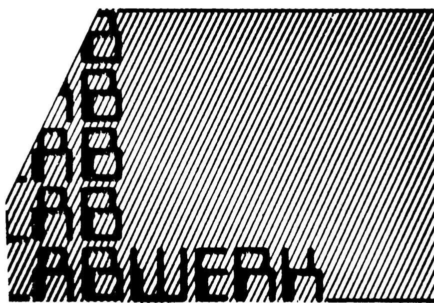
enerzijds direct voort uit het programma van onderzoek, maar is anderzijds ook het gevolg van beschikbare faciliteiten zoals de HFR en de eerder genoemde windturbine. Het onderzoek is deels fundamenteel van aard (vaste-stoffysica en kernfysica) of heeft zich ontwikkeld tot toegepaste fysica (reactorfysica) en is in sommige gebieden te kenschetsen als technische fysica (windenergie).

Nucleair onderzoek

In de reactorfysica worden processen in reactoren bestudeerd, zoals de vermenigvuldiging van neutronen en het transport van straling door materie. Door stagnatie in de toepassing van kernenergie in Nederland is het reactorfysische onderzoek beperkt van omvang gebleven. Het huidige programma heeft betrekking op:

- Ondersteuning van bestralingsexperimenten in de HFR; dit betreft de berekening van neutronenfluenties en energiespectra voor bestralingen van splijtstofelementen en van materialen bestemd voor fusiereactoren.
- Transportverschijnselen, b.v. ten behoeve van afschermingsberekeningen en in verband met de warmte- en stralingsbelasting bij opslag van radioactief afval. Nauwkeurige analyse van de verdeling van temperatuur en dissipatie van energie rondom op te slaan afval worden gebruikt om schattingen te maken van stralingsschade in steenzout.
- Neutronica van fusiereactoren. In het kader van het Europees programma van fusietechnologie is Nederland betrokken bij het JET-project in Culham (UK) en de toekomstige NET-reactor. Ten behoeve van deze projecten werd een systeem van rekencodes ontwikkeld voor de verdeling van de neutronenflux. Bij JET is de plasmadiagnostiek gebaseerd op zulk een fluxmeting en de bij het ECN ontwikkelde code FURNACE speelt een belangrijke rol in de interpretatie van thans in uitvoering zijnde metingen. In verband met grootheden als stralingsschade, energiedissipatie, activering en tritiumproduktie, die bepaald worden door de neutronenflux, is deze rekencode van belang voor de ontwikkeling van kweekmantel, afscherming en magneten voor NET.

- Ook in Europees verband voert ECN veiligheidsstudies uit voor de haalbaarheid van NET. Met behulp van thermohydraulische sprongkarakteristieken worden de gevolgen van pijpbreuk en het wegvallen van koeling in de kweekmantel van lithium-lood onderzocht. Daarnaast is in onderzoek de energiebelasting van de toruswand in geval van plasmadisrupties in de tokamak. De risico's die hieraan zijn verbonden, kan het hoofd worden geboden door een bescherming van de toruswand met hittevaste panelen. Voor beide potentiële risico's is vastgesteld dat de verstoringen dermate traag doorwerken, dat veiligheidssystemen voldoende tijd hebben om in werking te treden.
- In samenwerking met België en Duitsland draagt het ECN bij in de compilatie en evaluatie van kernfysische gegevens voor de neutronenhuishouding in kweekreactoren. Niet alleen zijn gegevens van vele splijtingsproducten opnieuw kritisch bekeken, hetgeen leidde tot nieuwe aanbevelingen, maar ook was het aanleiding tot het ontwikkelen van een model van pre-evenwichtprocessen in kernreacties.
- Meer nog dan voor splijtingsreactoren is het verzamelen van betrouwbare gegevens van belang voor de fusietechnologie en met name voor de neutronenenergieën tussen 5 en 15 MeV. Het ECN levert ook een bijdrage aan de evaluatie van nucleaire gegevens en heeft het beheer over de opslag van deze gegevens in de 'European Fusion File'.



- Experimentele reactorfysica wordt gedaan in de vorm van stralingsmetrologie, eveneens als onmisbare steun van reactorbedrijf en bestralingsexperimenten. De ontwikkeling van methoden van spectrumontvouwing op basis van experimentele gegevens van activeringssnelheden heeft de nauwkeurigheid van deze methode verhoogd. Dit is van belang voor het vaststellen van stralingsschade en daarmee gepaard gaande gasproductie in materialen voor fusiereactoren.
- De ervaring in het meten van straling wordt tevens benut in een programma voor methoden en systemen voor splijtstofbewaking. Daarbij wordt de meting van de 186 keV gammalijn van uranium-235 gebruikt, en afhankelijk van de controle van opslag- en transportvaten of van processtromen in een verrijkingsfabriek worden verschillende meetgeometrieën gebruikt. Daarbij moet b.v. nauwkeurig onderscheid worden gemaakt tussen gasstromen in een pijp en vaste afzettingen tegen de wand. Juist met het oog hierop wordt een andere methode ontwikkeld op basis van röntgenfluorescentie. Statistische methoden voor de verwerking van meetgegevens worden toegepast zowel in de metrologie als bij de splijtstofbewaking. In verband met internationale aspecten van beveiliging is het van belang dat dit werk is ingepast in Europees verband van samenwerking.
- Een ander voorbeeld van experimentele reactorfysica is het ruisonderzoek van de fluctuaties in neutronenflux, temperatuur of trillingsbewegingen. Er is een systeem ontwikkeld voor de behandeling van datareeksen en het toepassen van ruisanalyse door gebruik te maken van autoregressie-methoden en coherentie-analyse. Op die wijze worden niet alleen vermogensdichtheidsspectra van de fluctuaties verkregen, maar worden ook tijdconstanten van sensors bepaald. Vooral een directe koppeling van het systeem van data-acquisitie aan de reactor te Borssele (zie het artikel van Türkcan, dit nummer blz. 73) heeft geleid tot de vorming van een on-line detectiesysteem. Door toepassing van methoden van patroonherkenning wordt de methode ontwikkeld om te komen tot een expertsysteem voor foutendetectie en stabiliteitsanalyse dat in een breed gebied van technologische installaties kan worden toegepast.

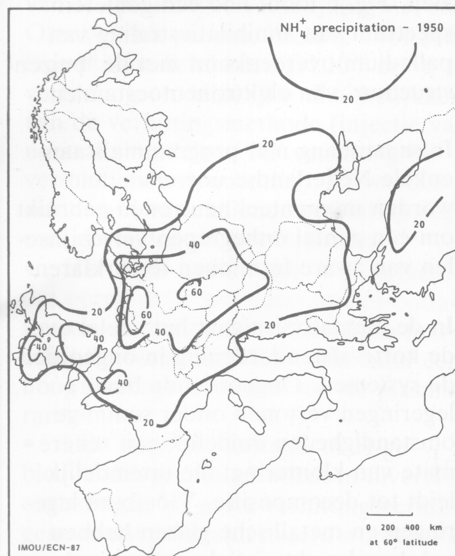
Fossiele energiedragers en milieuonderzoek

Verzuring van het Nederlandse ecosysteem wordt toegeschreven aan depositie van zwavel- en stikstofoxiden, ammoniak en hun volgproducten. Deze verontreinigingen worden over grote afstanden getransporteerd. Tijdens dit transport worden oxiden omgezet in zuren, ammonia reageert met zuren of wordt ook geoxideerd. Afhankelijk van heersende winden en bewolking heeft vermenging, verdunning en uitwassing plaats. Een dergelijk samengesteld proces van gebeurtenissen kan worden gemodelleerd met behulp van een stelsel vergelijkingen van Lagrange. Daarin wordt voor een bewegend luchtpakketje de verandering van verontreiniging dQ_1 uitgedrukt in de emissiesnelheid van bodem of schoorsteen verminderd met deposities in droge of in natte vorm (respectievelijk met snelheden v_1 en w_1) en met een deel dat wordt omgezet in een andere verontreiniging (met concentratie Q_2 met snelheidsconstante k_t):

$$\frac{dQ_1}{dt} = \frac{E}{H} - \left(\frac{v_1}{H} + \frac{w_1}{H} + k_t\right)Q_1 \,,$$

$$\frac{dQ_2}{dt} = k_t Q_1 - \left(\frac{v_2}{H} + \frac{w_2}{H}\right)Q_2 \,.$$

Hierin is H de hoogte van een luchtkolom waarin menging van verontreiniging voorkomt. Op deze wijze heeft een



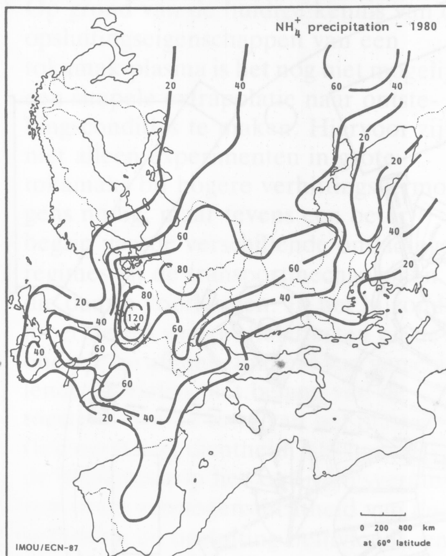


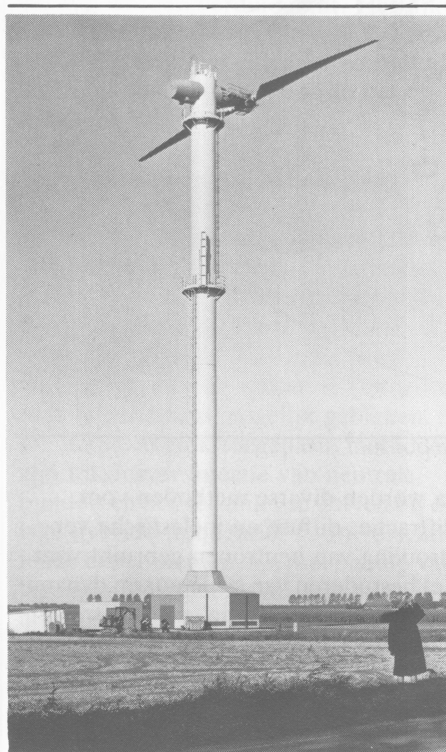
Fig. 2. Verspreiding van ammoniak over Europa, zoals wordt neergeslagen met regen (in µmol/l), berekend voor 1950 en voor 1980.

model voor transport van ammoniak over lange afstand geleid tot een beeld van de verspreiding over Europa dat overeenstemt met meetresultaten. Vergelijking van zulke berekende verdelingen (*fig 2*) laat zien hoezeer de ontwikkeling van de Nederlandse bio-industrie aan de verontreiniging heeft bijgedragen.

Een andere toepassing van procesmodellering sluit aan bij de ontwikkeling van milieuvriendelijke wijzen van energieconversie. In dat kader wordt gezocht naar het formuleren van de processen in brandstofcellen. Een brandstofcel is een elektro-chemisch systeem dat chemische energie van een brandstof rechtstreeks omzet in elektrische energie. Aan een anode wordt b.v. waterstof geïoniseerd en worden elektronen vrijgemaakt. De waterstofionen bewegen zich door een elektrolyt naar een kathode, waar zij met zuurstof en toestromende elektronen water vormen. In de verschillende onderdelen van de cel vinden transport en overdracht plaats, zoals de stromen gas of elektrolyt door poreus elektrodemateriaal en het ionentransport in het elektrolyt. Daarbij spelen de verdeling van gas en elektrolyt in een heterogeen medium een rol. Monte Carlo-simulaties bieden interessante mogelijkheden voor het beschrijven van zulke transportverschijnselen in poreuze en vloeibare media.

Stromingsenergie

Het onderzoek is hier voornamelijk geconcentreerd op windenergie en is daarbij gericht op de ontwikkeling van windturbines met lage kosten en lange levensduur. Het programma bestaat uit drie onderdelen: metingen, analyse en



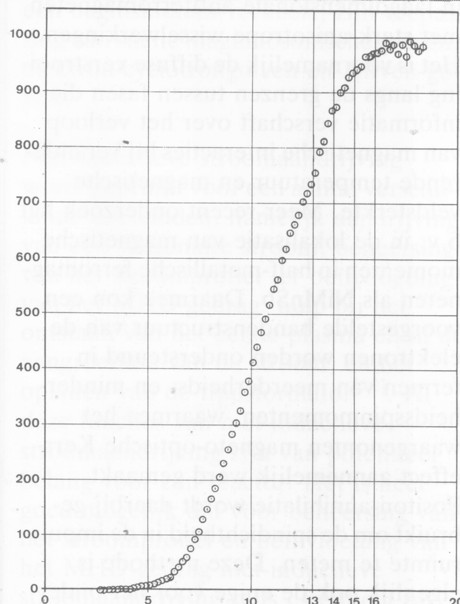
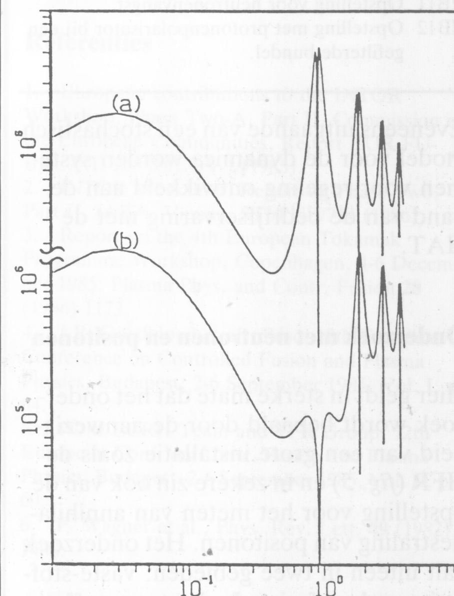


Fig. 3. Vermogen van de windturbine NEWECS 45 bij Medemblik (in kW) als functie van de windsnelheid (in m/s).

beoordeling van windturbines; rekenmodellen voor turbulentie en dynamica; ontwikkeling van geavanceerde windturbines. Metingen met betrekking tot energieproductie en functioneren van turbines worden uitgevoerd aan grote turbines zoals de 1 MW-molen bij Medemblik (*fig. 3*) en aan vele kleinere turbines op een eigen testveld. Uitvoerige procedures voor beproeving en beoordeling leidden tot een door de overheid erkende certificatie van windturbines.

In nieuwe ontwerpen van windturbines worden flexibele in plaats van starre bladen toegepast, ten einde rekening te houden met wisselende belastingen als gevolg van de turbulentie van de wind. Voor de analyse van de dynamica van machines met horizontale as (HATs) is een turbulentiemodel ontwikkeld. Fluctuaties in windsnelheden en turbinebelastingen worden geformuleerd in termen van frequentiespectra van krachten en koppels ten gevolge van turbulente wind. Deze spectra kunnen worden uitgedrukt in 'rotational modes' rondom de harmonischen van de rotatiefrequentie (*fig. 4*). De dynamica van flexibele bladen kan ook op deze wijze worden geformuleerd en de 'flapperende' bladbewegingen doen zich dan voor als frequentiefilters in de spectra. Metingen met de rotor met starre bladen van de 25 m HAT in Petten hebben dit fluctuatiemodel bevestigd. Daarbij blijkt dat genoemde filters worden bepaald door de fysische karakteristieken van de bladen, zoals de stijfheid en de demping.

Fig 4. Vermogensspectrum – $(Nm)^3$ vs Hz – van de fluctuaties ten gevolge van turbulente wind, in het koppel in de zwaairichting op een blad van de 25 m HAT (windturbine met horizontale as) in Petten, vermenigvuldigd met de frequentie. Curve *a* geldt voor een rotor met starre bladen, curve *b* voor een rotor met vrij scharnierende bladen. Er is duidelijk een concentratie rondom veelvouden van de rotatiefrequentie.



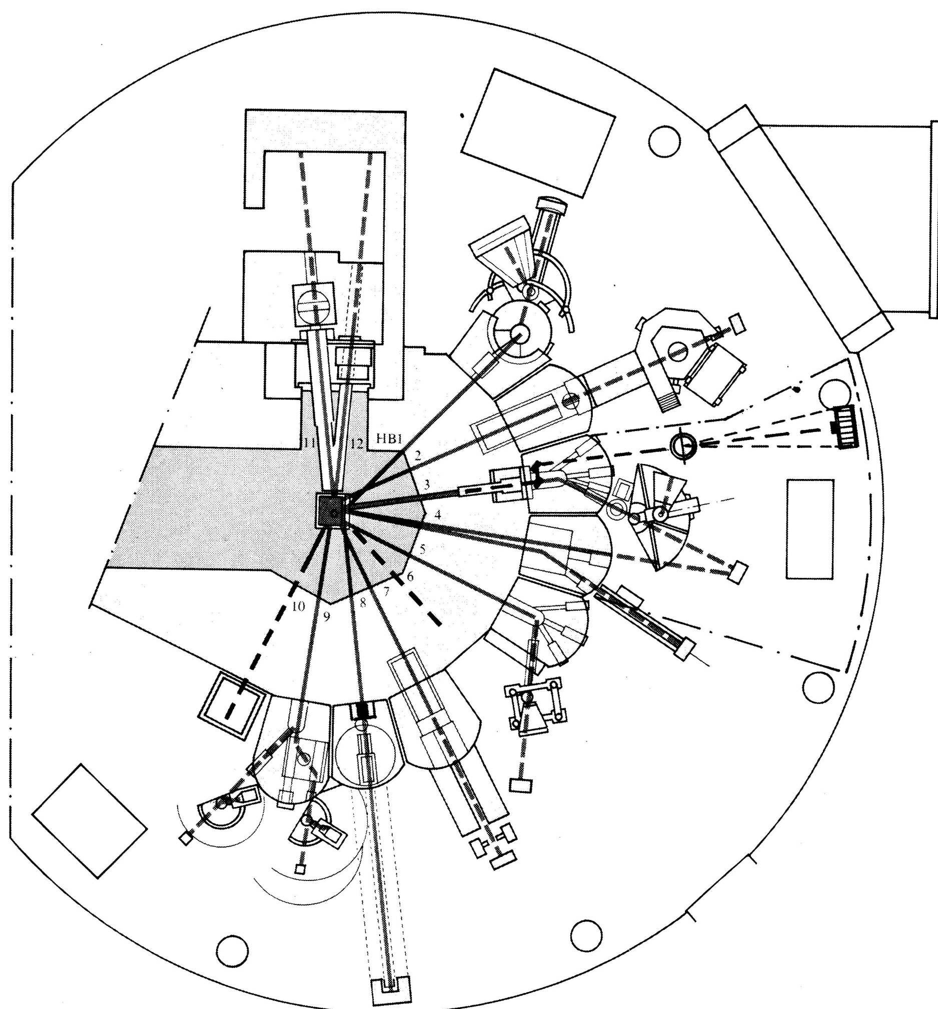


Fig. 5. Schematisch overzicht van de opstellingen voor experimenten met neutronenbundels bij de HFR.

HB1 Diffractometer voor diffuse verstrooiing/drie-kristalspectrometer.
HB2 Opstelling voor kernpolarisatie.
HB3 Drie-kristal-/vliegtijdsspectrometer. Opstelling voor verstrooiing over kleine hoeken.
HB4 Spectrometer voor vangstgammastraling.
HB5 Poederdiffractometer.
HB7 Spectrometer voor vangstgamma's met gepolariseerde neutronen.
HB8 Opstelling voor neutronenradiografie.
HB9 Eenkristaldiffractometer. Diffractometer met gepolariseerde neutronen.
HB10 Bestralingsfaciliteit voor activering.
HB11 Opstelling voor neutronenvangst.
HB12 Opstelling met protonenpolarisator bij een gefilterde bundel.

Eveneens uitgaande van een stochastisch model voor de dynamica worden systemen voor regeling ontwikkeld aan de hand van de bedrijfservaring met de HAT.

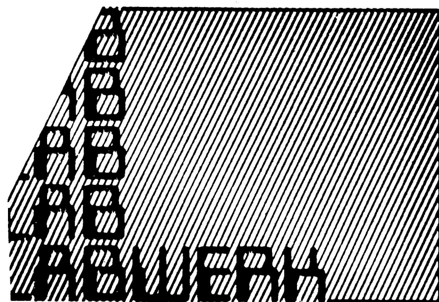
Onderzoek met neutronen en positonen

Hier geldt in sterke mate dat het onderzoek wordt bepaald door de aanwezigheid van een grote installatie zoals de HFR (*fig. 5*) en in zekere zin ook van de opstelling voor het meten van annihilatiestraling van positonen. Het onderzoek valt uiteen in twee gebieden: vaste-stoffysica en kernfysica. In de vaste-stoffysica worden diverse methoden voor diffractie, diffuse en inelastische verstrooiing van neutronen gebruikt voor het bestuderen van structuur en dynamica in de kristallografie, magnetisme en metaalfysica. Vooral door het magnetische moment van het neutron kan het gebruik van neutronen bijdragen tot de kennis van b.v. de relaties tussen fasen in laagdimensionale antiferromagneten met sterk anisotrope wisselwerkingen. Het is voornamelijk de diffuse verstrooiing langs de grenzen tussen fasen die informatie verschaft over het verloop van magnetische interacties bij veranderende temperatuur en magnetische veldsterkte. Meer recent onderzoek ligt b.v. in de lokalisatie van magnetische momenten in half-metallische ferromagneten als NiMnSb. Daarmee kon een voorgestelde bandenstructuur van de elektronen worden ondersteund in termen van meerderheids- en minderheidsspinmomenten, waarmee het waargenomen magneto-optische Kerr-effect aannemelijk werd gemaakt. Positon-annihilatie wordt daarbij gebruikt om de spindichtheid in de impulsruimte te meten. Deze methode is eigenlijk ook de enige voor het onderzoek van niet-verdunde ongeordende legeringen. Metingen aan b.v. een CuGe-legering laten de uitzetting van de structuur van het Fermi-oppervlak zien. *Fig. 6* toont hoe een gemeten spectrum van annihilatiestraling van palladium overeenkomt met de 'buizenstructuur' van elektronentoestanden.

In samenhang met programma's aan enkele Nederlandse universiteiten worden momenteel neutronen gebruikt om een aantal onbegrepen verschijnselen van zware fermionen te verklaren.

In de metaalfysica gaat het veelal over de korte-afstandordening in ongeordende systemen. Ongeordende binaire legeringen vertonen onder sommige omstandigheden duidelijk een zekere mate van klontering, die uiteindelijk leidt tot decompositie. Vloeibare legeringen en metallische glazen hebben ook hun karakteristieke wijzen van ordening. Het is opnieuw de diffuse verstrooiing die hier unieke mogelijkheden biedt.

Naast het fundamentele onderzoek is er thans een ontwikkeling om neutronenbundels te gebruiken voor het karakteriseren van materialen. Een zeer eenvoudig voorbeeld is het meten van de textuur in metaal. Van meer belang is echter het preciese verloop van restspanningen in metalen en metalen constructies. Hiervoor wordt met behulp van neutronendiffractie zeer nauwkeurig de rek in een werkstuk gemeten als functie van de positie. Een voorbeeld met brede mogelijkheden van toepassing is de neutronenverstrooiing over kleine hoeken, die een gebied van 1-100 nm bestrijkt als meetbare karakteristieke lengte. Het is juist in dat gebied dat ook b.v. door de grootte van poriën en deeltjes vele eigenschappen van materialen worden bepaald. Het meten van verdelingsfuncties voor deze grootheden draagt bij tot het karakteriseren van een materiaal. Met het meten van levensduur van positonen kan ook deze methode worden toegepast voor het karakteriseren van vooral 'defecte' materialen.



In overleg met de stichting FOM is het accent van het kernfysische onderzoek bij het ECN verschoven van kernspectroscopie naar de studie van de sterke wisselwerking, ook met behulp van neutronenvangst. Hiermee wordt aansluiting bereikt bij het werk met de versneller MEA bij het NIKHEF.

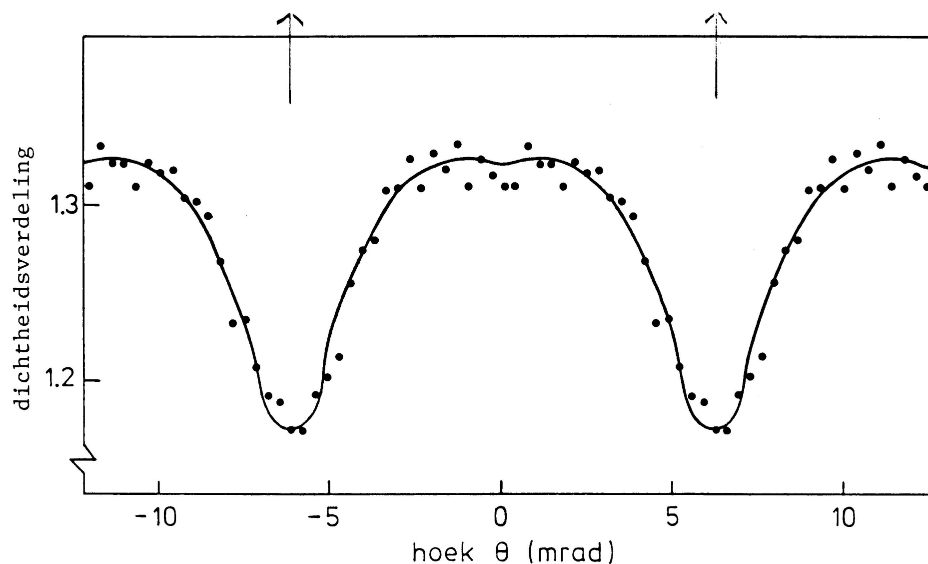


Fig. 6. Doorsnede van de 'buizenstructuur' van onbezette elektronentoestanden binnen het Fermi-oppervlak van palladium. Daaronder een verdeling van elektronendichtheden die werd verkregen door hoekcorrelatieverdeling van annihilatiestraling van positonen, corresponderend met hogere Brillouin-zones, terug te vouwen in de eerste zone. Ieder punt in de verdeling is een integratie langs een lijn in de bovenste figuur, zoals is aangegeven door pijlen.

De uitwisseling van mesonen tussen de neutronen en protonen in een atoomkern gaat gepaard met een elektrisch stroompje, en dit heeft een effect op de intensiteit en de polarisatie van gammastraling na een kernreactie. Met de beschikbare opstelling voor kernpolarisatie zal dit worden onderzocht aan lichte kernen, zals D en ^{3}He, waarvan bekend is dat de nucleonische bijdrage tot de werkzame doorsnede gering is.

Een dergelijke reactie zal grotendeels verlopen via stromen van virtuele mesonen.

Ten behoeve van onderzoek aan de astrofysische nucleosynthese wordt gemeten aan isomere toestanden van Lu-176. Nieuwe informatie hierover lijkt bestaande meningen over de leeftijd van het zonnestelsel te bevestigen. In een verder programma zal er aansluiting zijn bij meteorietenonderzoek in Nederland. De opstellingen bij de HFR bieden goede mogelijkheden voor onderzoek aan nog andere onderwerpen op kernfysisch terrein.

Boekbespreking

F. Cerulus, Quantummechanica, een inleiding voor ingenieurs, Uitgeverij ACCO, Leuven/Amersfoort, 194 pagina's tekst + ongeveer 100 pagina's met figuren, *f* 32,75.

Dit boek is ontstaan uit een college dat door de auteur gegeven wordt aan tweede-jaarsstudenten in de ingenieurswetenschappen aan de Katholieke Universiteit Leuven. Wat betreft inhoud en niveau is het vergelijkbaar met deel 4, Quantumfysica, van M. Alonso en met E.J. Finn, Fundamentele Natuurkunde. Het geeft een elementaire introductie tot de quantummechanica van eenvoudige, exact oplosbare systemen (rechthoekige potentiaalputten, waterstofatoom, Kronig-Penney-model e.d.) en van de uitbreiding tot systemen van meerdere niet-wisselwerkende identieke deeltjes. Storingsrekening, en daarmee wisselwerking met elektromagnetische velden, wordt niet behandeld.

Wat de opzet betreft is er een aanzienlijk verschil met Alonso en Finn. Waar deze laatsten vooral de nadruk leggen op het begrijpen van de fysische principes die aan de quantummechanica ten grondslag liggen, zijn die principes in Cerulus' boek tot het uiterste minimum beperkt. Het boek lijkt meer geschreven vanuit de gedachte dat het voor de ingenieur belangrijker is om in staat te zijn het mathematische formalisme te manipuleren, dan inzicht te krijgen in de samenhang van microscopische fysische processen. De mate van directheid en explicietheid die daarbij is betracht, heeft ongetwijfeld zijn voordelen. Aan de andere kant doet het geheel nogal schematisch aan, doordat vrijwel elke dieper gaande bespiegeling is vermeden. Dat geldt ook voor mathematische subtiliteiten als ontaarding van eigenwaarden, onbegrensdheid van operatoren en het verschil tussen discrete en continue spectra.

Het boek heeft, ook qua uitvoering, meer weg van een syllabus dan van een echt leerboek. Een index ontbreekt. Wèl is er bij ieder hoofdstuk een bibliografie van leerboeken die kunnen worden geraadpleegd voor achtergrondinformatie. Voor een goed begrip van de quantummechanica zal de gebruiker van Cerulus' boek deze additionele informatie zeker nodig hebben.

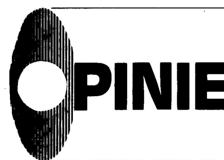
W.M. de Muynck

Kernenergie. De toekomst van ...

Hoe de wereld er ook uit moge zien in 2050, een samenleving waarin ook dan elektriciteit geen onmisbare plaats inneemt, lijkt me niet denkbaar. In het huishouden en in het bedrijf zal het de energiebron zijn voor koelen en verwarmen, voor licht en kracht, en voor communicatie in alle denkbare vormen. Alleen voor grootschalige bedrijven zal het zelf voorzien in de gewenste energievorm lonen, het overgrote deel zal via het net elektriciteit afnemen. Vervoer en transport zullen zeker schoner en misschien ook wel zuiniger worden door omschakeling op elektrische voortbeweging, al of niet met accu's, vliegwielen of waterstof als intermediair. Een toename van het aantal toepassingen van elektriciteit zal bijdragen aan een doelmatiger gebruik van grondstoffen en een vermindering van de milieubelasting.

Wereldwijd zal er een stijging van het elektriciteitsgebruik zijn. Als de door ons gewenste stijging van de levensstandaard van de ontwikkelingslanden doorzet en de daar verwachte groei van de bevolking doorgaat, zal de toename van het elektriciteitsgebruik daar aanzienlijk zijn. Te zamen met een stabilisatie of lichte daling in het westen zal het totaal ten opzichte van nu met 100% of meer kunnen stijgen.

De vraag is waar al deze elektriciteit vandaan moet komen. Er is nog een potentiëel aan waterkracht, maar de ontwikkeling daarvan is aan verschillende beperkingen onderhevig. Fossiele brandstoffen zullen duur en schaars worden, met uitzondering van steenkolen. Alternatieve energie op grote schaal is nog niet in zicht, kernfusie zal misschien een bijdrage gaan geven. Slechts kernenergie en steenkolen dienen zich aan als mogelijke bronnen voor opwekking. Tegen beide bestaan bezwaren; kernenergie geeft angst voor onveiligheid en steenkolen bedreigen het aardse milieu. In 1985 was de bijdrage van kernenergie aan de wereldproduktie van elektriciteit 15%, die van kolen 42%. Die 15% uit kernenergie heeft ongeveer 500 miljoen ton steenkolen, of een equivalente hoeveelheid olie of gas bespaard. De bijdrage aan de milieuverontreiniging door het verbranden van 500 miljoen ton steenkolen is enorm. Het gaat om de uitstoot en de depositie van tientallen miljoenen tonnen zwaveldioxide en stikstofoxiden, van zware metalen, aromatische koolwaterstoffen, vliegas en andere reststoffen en ook nog eens ongeveer 2 miljard ton koolzuurgas. Zulke grote jaarlijkse hoeveelheden leiden tot ingrijpende effecten op de volksgezondheid, op natuur en milieu, op klimaat en ecosystemen. De verdubbeling van de koolzuurconcentratie in de atmosfeer die in de loop van de volgende eeuw wordt verwacht, komt daarmee sneller dichterbij. Deze zal een stijging van de zeespiegel met zich meebrengen, klimaatveranderingen veroorzaken en verschuivingen teweeg kunnen brengen in gebieden waar de voedselproduktie marginaal is. Als geen steenkool zou zijn gebruikt maar olie, zou daardoor de olieproduktie ongeveer 8 à 9 miljoen vaten per dag hoger hebben moeten liggen dan thans het geval is. Daarmee zou bijna het volledige produktieoverschot van OPEC benut zijn en de olieprijs hoog zijn gebleven. De gevolgen daarvan zijn voor het westen ingrijpend en voor de ontwikkelingslanden desastreus.



Hoe ten behoeve van de welvaartsgroei in de ontwikkelingslanden een verdubbeling van het wereld-elektriciteitsgebruik in de komende decennia gerealiseerd zal moeten worden, blijft vooralsnog volstrekt onduidelijk. Als daartoe vooral fossiele brandstoffen moeten worden aangewend, zullen de genoemde milieueffecten in zo versterkte mate optreden dat zij internationaal onaanvaardbaar moeten worden geacht.

Dat moet de reden zijn waarom, ondanks Tsjernobyl, internationaal de conclusie is getrokken dat de bijdrage van kernenergie in de komende 50 jaar niet gemist kan worden. In Nederland is dat niet gebeurd, hoewel ook hier steeds beter beseft wordt dat die ontwikkeling voor het eigen milieu van belang is. De smog die in januari 1987 in ons land tot problemen leidde, werd voor een deel veroorzaakt door de grote hoeveelheden SO_2 die bij zachte oostenwind ons land bereikten uit Polen, de DDR en Tsjechoslowakije.

Het gezond blijven van mensen en bossen hangt sterk af van het milieubeleid van de landen om ons heen en achter het ijzeren gordijn. Als die erin slagen hun vuile centrales te vervangen door schone, zullen ook bij ons lucht en bodem schoner worden. Maar het verminderen van de uitstoot in de oostbloklanden zal een omschakeling op kernenergie vereisen. Die zal men dan wel veilig moeten weten te bedrijven, en daarin ligt een groot belang voor het westen.

Zal in de volgende eeuw kernenergie zo veilig zijn dat daarvoor een breed draagvlak is? Als er 1000 centrales in de wereld in gebruik zijn, waarvan ongeveer 400 in geheel Europa, zal de kans op een ongeval met kernsmelten en het ontsnappen van radioactiviteit per centrale zeer klein moeten zijn, liefst nul. Internationaal ziet men nog steeds een voorkeur voor de hogedruk-waterreactor, een type dat is ontwikkeld voor civiele toepassing na de succesvolle toepassing in onderzeeboten. Dat reactortype heeft een zeer groot vermogen in een klein volume en dat vereist extra veiligheidsvoorzieningen en geeft aanleiding tot angst bij de bevolking. Pogingen om nieuwe, veiliger typen te ontwikkelen, hebben nog geen omwentelingen teweeggebracht. Vóór Tsjernobyl was het troetelpaardje van Duitse politici de hoge-temperatuurreactor met heliumkoeling waarvan in Hamm een 300 MWe demonstratietype in gebruik is genomen. Er zal zeker nog een aantal jaren nodig zijn om de resultaten te kunnen beoordelen, maar het lijkt een stap in de goede richting. Ook in Canada is een ander type ontwikkeld en in gebruik genomen, de Canadese deuteriumreactor (CANDU), waarmee inmiddels al 215 (t.m. dec 1986) reactorjaren goede ervaring is opgedaan. Door de bouwers van beide genoemde typen wordt het smelten van de kern uitgesloten geacht.

Betreurd moet worden dat in ons land een groot deel van de eertijds opgebouwde deskundigheid verloren is gegaan en dat dit proces zich nog in onverminderde mate voortzet. We dragen niet meer bij aan de ontwikkelingen en toch zullen we ons een oordeel moeten kunnen vormen. Duidelijk is dat in ons land de publieke weerstand groot is. Zonder een voldoend breed draagvlak moet men niet aan kostbare plannen beginnen. Maar zonder een uitzicht op de lange termijn, en daarvoor is concensus nodig, zal op den duur een deel van de elektriciteit uit het buitenland moeten komen en zal onze stroomintensieve industrie zich elders vestigen. Dat proces is inmiddels begonnen en zal moeilijk meer te keren zijn.

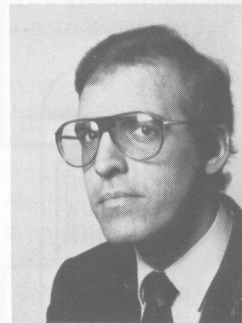
Het gaat ernaar uitzien dat we in de volgende eeuw meer geld zullen uitgeven aan de bouw van nieuwe en hogere dijken dan aan kerncentrales. Het voordeel daarvan is dat we blijven bij een activiteit die we beheersen en een risico waarmee we al eeuwen hebben leren leven, zodat we er geen angst voor hebben.

R. Braams

Dr. R. Braams, voorheen hoogleraar in de moleculaire biofysica aan de Rijksuniversiteit Utrecht, is sedert 1977 voor de VVD lid van de Tweede Kamer der Staten-Generaal.

Kernreactoren voor elektriciteitsproduktie

J.E. Hoogenboom



Dr. ir. J.E. Hoogenboom studeerde technische natuurkunde te Delft, waar hij na zijn afstuderen in dienst trad bij de vakgroep Reactorfysica. Hij promoveerde in 1977 op de toepassing van de statistische montecarlomethode voor neutronentransport. Thans verricht hij onderzoek op het gebied van de reactorruis en enkele andere onderwerpen uit de reactorfysica. Hij bekleedde verschillende functies op kernenergiegebied in nationaal en internationaal verband.

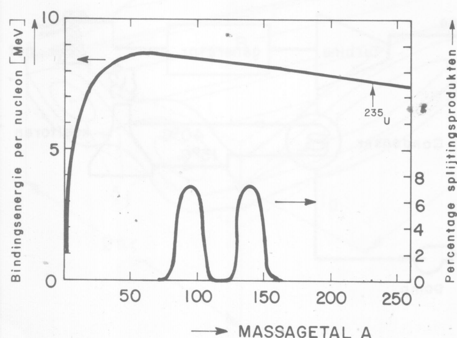
De kernenergie heeft in zijn 45-jarig bestaan reeds een bewogen ontwikkeling doorgemaakt. Na zich ontworsteld te hebben aan de vereenzelviging met de atoombom, leek in de jaren vijftig en zestig een glansrol weggelegd voor deze goedkoop, schoon en vrijwel onuitputtelijk geachte energiebron. Terwijl allengs bleek dat dit veel te optimistisch was geschat, groeide tevens het maatschappelijk verzet tegen kernenergie, wat in verschillende landen tot radicale bijstelling van de prognoses leidde en zelfs tot besluiteloosheid. Nadat ook de slag die werd toegebracht door het ongeluk in 1979 met de kernenergiecentrale bij Harrisburg was verwerkt, leken de vooruitzichten weer gunstiger. Totdat de ramp met de centrale in het Russische Tsjernobyl vorig jaar plaatsvond. Zou dit het definitieve einde van de kernenergie inluiden?

In dit artikel wordt uiteengezet, hoe een kernenergiecentrale werkt, hoe de toepassing van kernenergie er in de wereld bijstaat, waar de discussies tussen voor- en tegenstanders thans nog over gaan en welke vooruitzichten er voor langdurige toepassing van kernenergie zijn, bezien vanuit de technische mogelijkheden.

Het fysische principe

De energie die in kernreactoren wordt vrijgemaakt, wordt verkregen uit de bindingsenergie die protonen en neutronen in een atoomkern bijeen houdt. Naarmate een kern meer nucleonen (kerndeeltjes) bevat, neemt de bindingsenergie toe. Zet men echter de bindingsenergie per nucleon uit (*fig. 1*), dan vertoont de curve een maximum bij massagetal $A \approx 60$. Indien we in staat zijn een zware kern, b.v. $^{235}_{92}U$, in twee ongeveer gelijke brokstukken te splitsen, dan komt er per kerndeeltje een bindingsenergie van $8{,}45 - 7{,}60 = 0{,}85$ MeV vrij, totaal dus ca. 200 MeV. Dit is een gigantische hoeveelheid energie vergeleken met de enkele eV die vrijkomt bij een chemische reactie, b.v. verbranding van koolstof tot CO_2. Een eenvoudige berekening leert dat volledige versplijting van 1 g U een energie oplevert van ca. 1 MWd of 24000 kWh. Ziedaar het enorme potentieel van kernenergie.

Fig. 1. De bindingsenergie per nucleon als functie van het massagetal *A*. In de figuur is alleen de gemiddelde bindingsenergie bij een massagetal weergegeven; in feite bestaat er een zekere spreiding rondom deze gemiddelde waarde voor kernen met verschillend atoomnummer bij hetzelfde massagetal. Tevens is weergegeven de verdeling van de splijtingsprodukten voor verschillende massagetallen. Duidelijk blijkt de voorkeur voor asymmetrische splijting.



Zware kernen kunnen tot splijting komen bij toevoer van voldoende energie door beschieting met een neutron. Voor een U-235-kern is de extra bindingsenergie die het geabsorbeerde neutron inbrengt daarvoor voldoende en kan splijting plaatsvinden door langzame neutronen. Voor het in de natuur meest voorkomende (99,3%) isotoop van uranium, het U-238, ligt dat ongunstiger en is een kinetische energie van het neutron van ca. 1 MeV nodig. In het algemeen geldt dat van de zeer zware kernen ($A \geq 90$) de zgn. even/oneven-kernen, dwz. kernen met een even aantal protonen en een oneven aantal neutronen, door langzame neutronen tot splijting kunnen worden gebracht, de even/even-kernen slechts door snelle neutronen.

Bij splijting ontstaan twee brokstukken, de splijtingsprodukten, die bij iedere splijtingsreactie weer anders samengesteld kunnen zijn. De massaverdeling van alle mogelijke splijtingsprodukten is eveneens weergegeven in fig. 1, waaruit men kan zien dat er een duidelijke voorkeur is voor *asymmetrische* splijting. Daar het aantal neutronen in stabiele kernen meer dan evenredig toeneemt met het aantal protonen, vertonen de splijtingsprodukten een overschot aan neutronen, dat door herhaald β^--verval wordt gereduceerd. De splijtingsprodukten met hun vervalkernen vertegenwoordigen het overgrote deel van de radioactiviteit in een kernreactor en leveren ca. 7% van de eerder berekende energie per splijting. Bij de splijting komen ook neutronen vrij, in aantal variërend van 0 tot 6 al naar de preciese reactie, maar gemiddeld 2,43 bij splijting van U-235 door langzame neutronen. Door deze vrije neutronen is het mogelijk een kettingreactie in stand te houden, indien gemiddeld ten minste één bij splijting vrijkomend neutron voor een nieuwe splijting zorgt. De overige vrijkomende neutronen kunnen voor de kettingreactie verloren gaan door vangst in de splijtstof zonder splijting, vangst in andere materialen of doordat zij uit de reactor vliegen.

De kernenergiecentrale

De energie die bij splijting van een atoomkern vrijkomt, wordt voor het grootste deel als kinetische energie meegegeven aan de splijtingsfragmenten. Daar deze een dracht van slechts enkele μm hebben, dragen zij hun energie vrijwel direct in de vorm van warmte over aan de omringende splijtstof. Ook de energie van de bij splijting vrijkomende neutronen en γ-straling, alsmede de vervalenergie van de splijtingsprodukten wordt in de reactor in warmte omgezet. Slechts de energie die de neutrino's bezitten die bij splijting ontstaan, gaat voor de energiewinning verloren.

In een reactor voert men de warmte af door een koelmiddel langs de splijtstof te doen stromen. Daartoe wordt de splijtstof in de vorm van staven gebundeld tot een splijtstofelement. Enkele honderden splijtstofelementen vormen te zamen de reactorkern. Veruit het meest toegepaste koelmiddel is water. Men spreekt dan van licht-waterreacto-

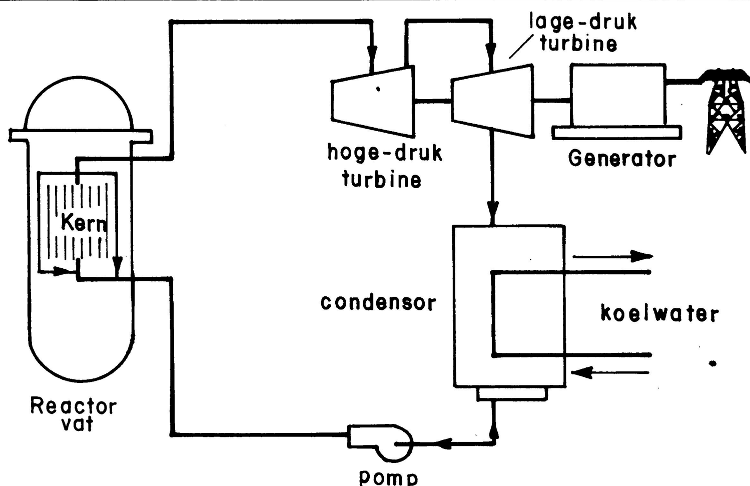


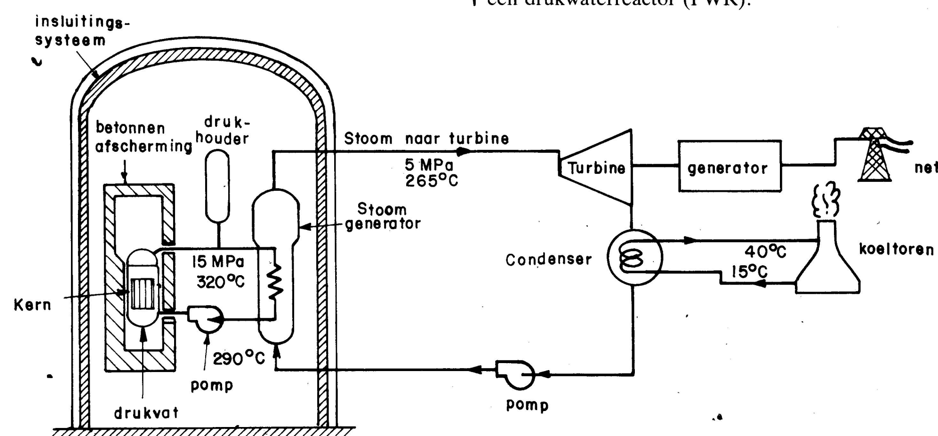
Fig. 2. Principe-schema van een kernenergiecentrale met een kokend-waterreactor (BWR).

ren, waarbij de term licht water, H_2O, gebruikt wordt ter onderscheiding van zwaar water, D_2O, dat in een ander type reactor wel wordt toegepast. Bij de licht-waterreactoren onderscheidt men de kokend-waterreactor (BWR = boiling water reactor) en druk-water-reactor (PWR = pressurized water reactor). *Fig. 2* geeft een principe-schets van een kernenergiecentrale met een BWR. Het koelwater dat met een temperatuur van ca. 275 °C de kern inkomt, wordt opgewarmd tot de verzadigingstemperatuur van 286 °C bij de heersende druk (ca. 7 MPa), waarna koken optreedt. Na afscheiding van het water wordt de stoom gedroogd en naar de stoomturbine geleid. Hier expandeert de stoom in de hoge-drukturbine en vervolgens in lage-drukturbines, waarbij het via schoepen de as van de turbine in rotatie brengt. Op deze as is de generator gekoppeld, die het produkt levert waar het om begonnen is: elektriciteit. De stoom wordt na verrichte arbeid tot water gecondenseerd in de condensor, waartoe koelwater van buiten gebruikt wordt, vaak rivier- of zeewater, maar eventueel ook circulerend koelwater dat zijn warmte weer afstaat aan de buitenlucht in een koeltoren. De gecondenseerde stoom wordt weer teruggepompt naar de reactorkern. Vanwege de hoge druk van het primaire koelwater is de reactorkern in een stalen drukvat geplaatst.

In een druk-waterreactor wordt de druk door middel van een drukgenerator vergroot tot ca. 15 MPa, zodat het koelwater niet kan gaan koken. Het hete water van 320 °C wordt naar een stoomgenerator geleid, een warmtewisselaar waarin aan de secundaire zijde bij lagere druk stoom wordt gevormd. De stoom legt vervolgens dezelfde weg af door stoomturbine en condensor als bij een BWR. Hier blijven de koelcircuits echter gescheiden, zodat geen radioactieve verontreiniging in de turbine of condensor kan komen. *Fig. 3* laat schematisch een PWR-centrale zien, met daarin tevens aangegeven de betonnen insluitingsconstructie, waarin kern, drukgenerator, stoomgenerator en voedingswaterpompen zijn ondergebracht. Deze constructie moet ook bij een ernstig ongeval het mogelijk vrijkomende radioactieve materiaal binnen het reactorgebouw houden. Ook een BWR kent een insluitingssysteem, dat meestal anders wordt uitgevoerd.

Het feit, dat in een PWR geen koken in de kern optreedt, leidt tot een groot aantal praktische verschillen met een BWR. Door de betere koeling van de één-fasestroming is de vermogensdichtheid in een PWR aanzienlijk groter (ca. 100 MW/m^3 tegen ca. 50 MW/m^3 in een BWR). Karakteristieke afmetingen van de kern van een grote licht-waterreactor zijn 4 m diameter en 4 m hoogte.

Door de temperatuurbegrenzingen in de splijtstof en het koelmiddel is ook de temperatuur van de gevormde stoom beperkt. Dit veroorzaakt een betrekkelijk laag rendement bij de omzetting van warmte in elektrische energie, dat voor licht-waterreactoren ca. 33% bedraagt. Voor een moderne conventionele centrale is dit ca. 40%. Dit betekent, dat voor een kernenergiecentrale meer secundair koelwater nodig is.



Het vermogen van een centrale wordt meestal uitgedrukt in MWe, ter aanduiding van het elektrische vermogen in tegenstelling tot het thermische vermogen. De grootte van thans in aanbouw zijnde of geplande kernenergiecentrales ligt doorgaans tussen 900 en 1400 MWe. De grootste kernenergiecentrale, met een vermogen van 1500 MWe, is gebouwd te Ignalinsk in de Sovjet-Unie.

Reactorfysica

Naast de werktuigbouwkundige, materiaalkundige, chemische en elektrotechnische aspecten van het ontwerp en laten functioneren van een kernenergiecentrale zijn de reactorfysische aspecten van groot belang voor een veilig en doelmatig ontwerp van de reactorkern en voor het zgn. splijtstofbeheer. Voor een nauwkeurige berekening van de neutronenhuishouding in de kern van de reactor is een volledige beschrijving van de neutronendichtheid naar plaats en energie van de neutronen nodig. Voor het splijtstofbeheer is tevens de tijdafhankelijkheid over termijnen van maanden en jaren van belang, terwijl voor de regeling en voor mogelijke ongevalssituaties het tijdafhankelijk gedrag over veel kortere tijden van belang is.

Het neutronentransport wordt beschreven door de al bijna een eeuw oude vergelijking van Boltzmann, die opgesteld werd voor de dichtheidsverdeling van gassen. Hoewel de neutronentransportvergelijking een vereenvoudigd geval hiervan is, daar geen neutron-neutron-interacties in beschouwing hoeven te worden genomen, is ook met de huidige supercomputers een complete oplossing onmogelijk. Daarom worden in de praktijk allerlei benaderingsmethoden toegepast om tot een oplossing te komen. Met een eenvoudige beschrijving kan men echter al inzicht krijgen in de invloed van verschillende parameters op de neutronenhuishouding.

Fig. 3. Schema van een kernenergiecentrale met een drukwaterreactor (PWR).

De neutronen in een reactor kunnen beschouwd worden als behorend tot opeenvolgende generaties. De verhouding van aantallen neutronen in twee opeenvolgende generaties kunnen we definiëren als de vermenigvuldigingsfactor k van de reactor. Voor een stationaire neutronenbevolking moet gelden $k = 1$. In die situatie heerst er evenwicht tussen produktie van neutronen door splijting en verdwijnen van neutronen door absorptie (inclusief absorptie in de splijtstof, die tot splijting leidt) en weglekken van neutronen uit de reactor. Daar men in eenvoudige benadering kan stellen dat de produktie en de absorptie evenredig zijn met het *volume* van een reactor en de lek evenredig met de *oppervlakte*, is er bij gegeven materiaalsamenstelling een grootte van de reactor waarbij $k = 1$. Maakt men $k > 1$, b.v. door splijtstof toe te voegen, dan zal de neutronenbevolking voortdurend blijven toenemen. Pas wanneer de toegevoegde splijtstof weer verwijderd wordt en de vermenigvuldigingsfactor weer gelijk aan 1 wordt, zal de neutronenbevolking zich weer stabiliseren, maar op een hoger niveau. Dit mechanisme werkt dus principiëel anders dan b.v. dat bij een auto, waar men het gaspedaal dieper ingedrukt moet houden voor een blijvend hogere snelheid. Een reactor kan in principe bij elke omvang van de neutronenbevolking en dus bij elk vermogen kritiek zijn en stationair op dat vermogen functioneren.

Het vermogen van een reactor wordt beperkt door de maximaal toelaatbare temperatuur van splijtstof en koelmiddel. Bij maximale toelaatbare neutronenflux op de heetste plaats in de reactor kan het vermogen nog vergroot worden door meer splijtstofelementen toe te passen en het overschot aan produktie van neutronen die dit met zich meebrengt, te compenseren door extra neutronenabsorberend materiaal toe te voegen.

De bij splijting vrijkomende neutronen hebben een energie van ca. 1 MeV, waarbij de kans op interactie met een splijtstofkern relatief klein is. Om de kans op een interactie aan te geven, wordt het begrip werkzame doorsnede σ geïntroduceerd, dat het effectieve trefoppervlak per atoomkern aangeeft. Door quantummechanische effecten kan dit effectieve trefoppervlak vele malen groter zijn dan de klassieke doorsnede van de atoomkern. De werkzame doorsnede is afhankelijk van de energie van het neutron, waarbij deze in het algemeen toeneemt voor afnemende neutronen-energie. Daarom is het gunstig de splijtingsneutronen af te remmen door botsingen met een moderator, een stof met kernen met geringe massa voor een goede energie-

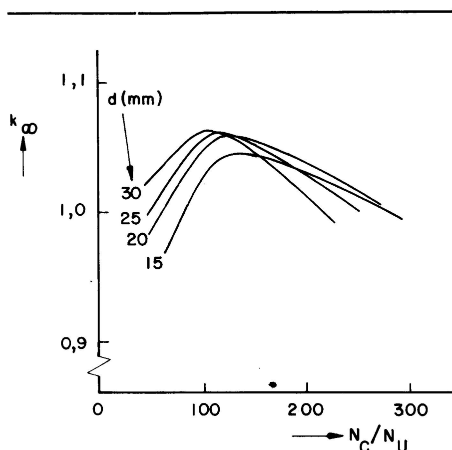


Fig. 4. De vermenigvuldigingsfactor k_∞ voor een oneindig grote reactor (dus zonder lek) bestaande uit splijtstofstaven van natuurlijk uranium met daartussen grafiet als moderator, als functie van de verhouding van de kerndichtheid N_C van het grafiet en N_U van het uranium. De parameter d is de diameter van de splijtstofstaven.

overdracht. In licht-waterreactoren doet het koelmiddel tevens dienst als moderator. De verhouding van het aantal moderatorkernen tot het aantal splijtstofkernen is een belangrijke parameter. Indien er te veel moderatorkernen zijn, zal de parasitaire absorptie hierin belangrijk worden. Bij te weinig moderatorkernen neemt vooral de kans op vangst van neutronen in U-238 in het intermediaire energiegebied toe, waar de werkzame doorsnede sterke resonantiepieken vertoont; zie fig. 1 in het artikel van Van Dam. Er bestaat daarom een optimale verhouding van moderator en splijtstof. In *fig. 4* wordt de vermenigvuldigingsfactor k_∞ weergegeven als functie van de verhouding moderator/splijtstof voor een oneindig groot systeem (dus zonder lek van neutronen), bestaande uit splijtstofstaven van natuurlijk uranium met daartussen grafiet als moderator.
Uit veiligheidsoverwegingen zal men een reactor in het algemeen echter niet op het optimum ontwerpen maar 'ondergemodereerd', d.w.z. de verhouding moderator/splijtstof kleiner kiezen dan bij het optimum. Indien in zo'n reactor het vermogen onbedoeld zou toenemen, stijgt de temperatuur van het koelmiddel annex moderator en het aantal moderatorkernen per volume-eenheid neemt af. Dit leidt volgens fig. 4 tot een lagere vermenigvuldigingsfactor, die de verstoring in het vermogen tegenwerkt. Men spreekt dan van een negatieve temperatuurcoëfficiënt van de reactor, hetgeen een belangrijk inherent veiligheidsmechanisme is. Bij toepassing van licht water als moderator ligt het optimum bij veel kleinere volumeverhoudingen van moderator en splijtstof dan bij grafiet, daar licht water veel meer neutronen absorbeert. Daardoor zijn licht-waterreactoren veel compacter.
Uit deze beschouwing blijkt, dat ook in een kernreactor terugkoppelingseffecten op de vermenigvuldigingsfactor optreden, o.a. via veranderingen van de temperatuur in de reactor en de verhouding moderator/splijtstof. De grootte van deze effecten en zelfs het teken ervan (mee- of tegenkoppeling) zijn afhankelijk van het ontwerp van de reactor. Indien er geen voldoende terugkoppeling aanwezig is, kan de vermenigvuldigingsfactor zó lang groter dan 1 blijven dat er een vermogensexcursie optreedt. Hierbij zal het vermogen, en daarmee de temperatuur, zo sterk oplopen dat de splijtstof kan smelten. Mede doordat het koelwater annex moderator dan inmiddels verdampt zullen zijn, zal de kettingreactie uiteindelijk altijd zichzelf doven. Een kernreactor kan niet, zoals een kernwapen, exploderen! Dat de schade bij een dergelijk ongeval niettemin enorm kan zijn, is uit het ongeval met de centrale te Tsjernobyl wel gebleken. Voor de berekening van het verloop van een vermogensexcursie moet reactorkinetica gecombineerd worden met thermohydraulica onder belangrijk veranderende stromingsomstandigheden, hetgeen deze berekeningen zeer gecompliceerd maakt.

Vanwege de relatief sterke absorptie van neutronen in licht water, is het niet mogelijk met natuurlijk uranium (0,71% U-235) een kritieke reactor te bouwen. Daarom past men in deze reactoren verrijkte splijtstof toe met ca. 3% U-235. Het effect van splijtstofverrijking wordt vooral weergegeven door de reproduktiefactor η, die het aantal neutronen aangeeft dat bij splijting vrijkomt per in de splijtstof gevangen neutron. Hierin wordt dus verdisconteerd de kans op vangst zonder daaropvolgende splijting. Voor uranium geldt[1]:

$$\eta = \nu \frac{N_5\sigma_{f5}}{N_5\sigma_{f5} + N_5\sigma_{c5} + N_8\sigma_{c8}},$$

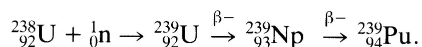
met
ν het aantal neutronen dat bij splijting vrijkomt (2,43),
σ_{f5} de werkzame doorsnede van U-235 voor splijting door thermische neutronen (577×10^{-28} m^2),
σ_{c5} de werkzame doorsnede voor vangst in U-235 (101×10^{-28} m^2),
σ_{c8} idem voor U-238 ($2{,}7 \times 10^{-28}$ m^2),
N_5 en N_8 aantal kernen per volume-eenheid van resp. U-235 en U-238.
De vermenigvuldigingfactor k is evenredig met η, zodat daarmee geschat kan worden hoe sterk de vermenigvuldigingsfactor toeneemt bij verrijking van de splijtstof. Behalve voor het bereiken van een kritieke massa is verrijking ook wenselijk om gedurende een voldoend lange tijd het verbruik van splijtstof te kunnen compenseren, alsmede andere factoren die het evenwicht in de kettingreactie verstoren. Daarom is de ver-

menigvuldigingsfactor van een reactorkern met verse splijtstofelementen aanzienlijk groter dan 1, wat tijdelijk gecompenseerd moet worden door sterk neutronenabsorberende regelstaven en toevoeging van borium aan de moderator of b.v. gadolinium aan de splijtstof.

De splijtstofcyclus

Uranium wordt op vele plaatsen in de natuur gevonden in verschillende ertsen en in zeer uiteenlopende concentraties. Ook komt het voor in zeewater met een concentratie van 3 mg/m^3. Er is in de wereld een vrijwel onuitputtelijke hoeveelheid splijtstof beschikbaar, maar dit betekent niet dat die ook altijd economisch winbaar is. Thans wordt uranium gedolven uit ertsen die 0,1 tot 0,5% uranium bevatten. De voorraden die nog tegen redelijk geachte prijzen kunnen worden gewonnen, worden geschat op 5 miljoen ton uranium. De exploratie van uranium is echter nog zeer onvolledig. Neemt men ook de zgn. speculatieve voorraden in beschouwing die op grond van geologische overwegingen aanwezig moeten zijn, dan worden de voorraden vervijfvoudigd.
Het gewonnen uraniumoxyde wordt in een conversiefabriek omgezet in het gasvormige UF_6, waarna het verrijkt kan worden. Dit gebeurt grotendeels nog met de gasdiffusiemethode, waarbij het gas door een semipermeabele wand wordt geperst, waarbij er enige scheiding optreedt. In Nederland wordt evenals in Engeland en Duitsland het ultracentrifugeproces met succes toegepast. Na verrijking wordt de splijtstof weer omgezet in UO_2 en tot splijtstoftabletten gesinterd, waarvan splijtstofstaven en -elementen worden gefabriceerd.

In de licht-waterreactor neemt door versplijting en neutronenvangst de concentratie U-235 langzaam af, waardoor een splijtstofelement op zeker moment uit de reactor verwijderd moet worden omdat anders de reactor niet meer kritiek gemaakt kan worden. (In de praktijk eerder, omdat een brandstofstaaf door het ontstaan van de splijtingsprodukten zwelt, en op den duur kapot zou gaan.) Daar de neutronenfluxdichtheid door lek van de neutronen uit de reactor niet overal gelijk is, zal de versplijtingsgraad van de elementen ook verschillen en worden elk jaar 1/4 à 1/3 van de elementen vervangen door verse elementen, waarbij tegelijk een herschikking van alle elementen plaatsvindt. Deze wordt door middel van berekeningen zo bepaald dat de splijtstof over zijn gehele levensduur in de reactor, dus 3 à 4 jaar, optimaal benut wordt. Gebruikte splijtstof bevat nog ca. 1% U-235 en is dus nog steeds verrijkt als hij uit de reactor komt. Het U-238 wordt nauwelijks verspleten, maar na vangst van een neutron ontstaat er Pu-239 volgens de reactie



$$^{238}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{239}_{92}U \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{93}Np \xrightarrow{\beta^-} ^{239}_{94}Pu.$$

Naarmate de splijtstof langer in de reactor aanwezig is neemt de concentratie Pu toe en vindt een deel van de splijtingen ook in Pu plaats. Men definieert de conversieverhouding *C* als het aantal gevormde splijtbare kernen per verbruikte splijtbare kern (door splijting of vangst). Als de splijtstof zijn maximale versplijtingsgraad behaald heeft, is van de totaal geproduceerde energie ongeveer 1/3 afkomstig van versplijting van Pu. Voor de produktie van 1 GWa aan elektrische energie is dan ca. 150 ton natuurlijk uranium nodig geweest.

In een opwerkingsfabriek worden de splijtingsprodukten uit de splijtstof verwijderd en het Pu afgescheiden. Het resterende uranium kan na herverrijking weer als splijtstof voor licht-waterreactoren worden toegepast. Hetzelfde geldt voor het plutonium, dat echter speciaal geschikt is voor de nog te bespreken 'snelle' reactoren. Terwijl het restant van de splijtstof weer nuttig gebruikt kan worden, vormen de sterk radioactieve splijtingsprodukten het echte afval, dat zorgvuldig behandeld moet worden om niet vroeg of laat in het milieu terecht te komen. Voor immobilisatie van de splijtingsprodukten worden deze ingesmolten in borosilicaatglas, dat in roestvaststalen cilinders wordt bewaard. Deze methode wordt al geruime tijd in verschillende landen toegepast.

De snelle kweekreactor

Ondanks het feit dat in de loop der tijd vele, zeer uiteenlopende reactorontwerpen zijn bestudeerd, hebben naast de licht-waterreactoren slechts enkele typen het tot het commerciële stadium gebracht. Hiervan moeten genoemd worden de zwaar-waterreactoren, die vooral in Canada ontwikkeld zijn en zwaar water als koelmiddel en moderator toepassen, en de gas-grafietreactoren, die vooral in Engeland zijn ontwikkeld. Beide typen kunnen werken met natuurlijk uranium als splijtstof, hetgeen destijds de belangrijkste overweging voor hun ontwikkeling is geweest. De Engelse grafietreactoren worden gekoeld met CO_2-gas, waarvoor een speciale bekleding van de splijtstof is ontwikkeld, genaamd magnox. Alhoewel dit reactortype verder verbeterd is, worden de vooruitzichten ervan negatief beoordeeld. Veel meer perspectief biedt de thans in de Bondsrepubliek Duitsland ontwikkelde hoge-temperatuurreactor met heliumkoeling, waar kleine bolletjes splijtstof verpakt worden in grafietbollen ter grootte van een tennisbal. De reactorkern bestaat dan uit een losse stapeling van deze ballen. *Tabel 1* geeft een overzicht van de gangbare typen.

Veruit het belangrijkste reactortype voor de toekomst is de 'snelle' kweekreactor. Dit type is gebaseerd op een veel beter splijtstofverbruik. In een thermische reactor wordt slechts ca. 3% van de splijtstof daadwerkelijk verspleten, deels via Pu. Indien men een hoge conversiefactor *C* kan bereiken, zou het nuttig gebruik van het uranium sterk toenemen, zoals uit *fig. 5* is af te leiden. Voor licht-waterreactoren geldt $C \approx 0,6$. Indien $C > 1$ is, wordt er meer splijtstof gevormd dan verbruikt en spreekt men van 'kweken'. De benutting

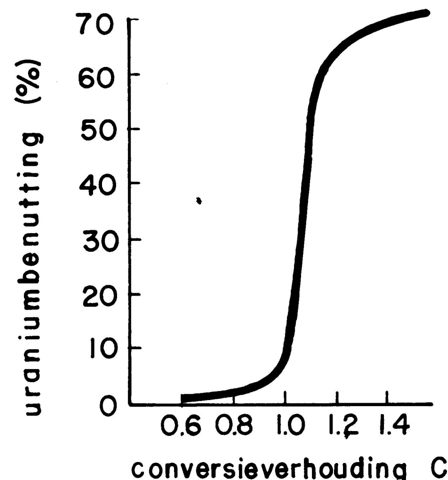


Fig. 5. De uraniumbenutting als functie van de conversieverhouding *C*, d.i. het aantal gevormde splijtbare kernen per verbruikte splijtbare kern. Indien $C > 1,1$ is, wordt ook een groot deel van het U-238 benut via conversie naar Pu.

Tabel 1. Reactortypen.

PWR	Pressurized Water Reactor	Licht-waterreactor met koelmiddel onder hoge druk.
BWR	Boiling Water Reactor	Licht-waterreactor waarbij het koelmiddel in de kern kan koken.
HWR	Heavy Water Reactor	Zwaar-waterreactor.
GCR	Gas Cooled Reactor	Met gas gekoelde reactor, meestal met grafiet als moderator.
HTR	High Temperature Reactor	Hoge-temperatuurreactor met helium als koelmiddel en grafiet als moderator.
FBR	Fast Breeder Reactor	Snelle kweekreactor.
RBMK	Reactore Bolchoe Molchnastie Kipiachie	Russische met grafiet gemodereerde en met licht water gekoelde kokend-waterreactor.

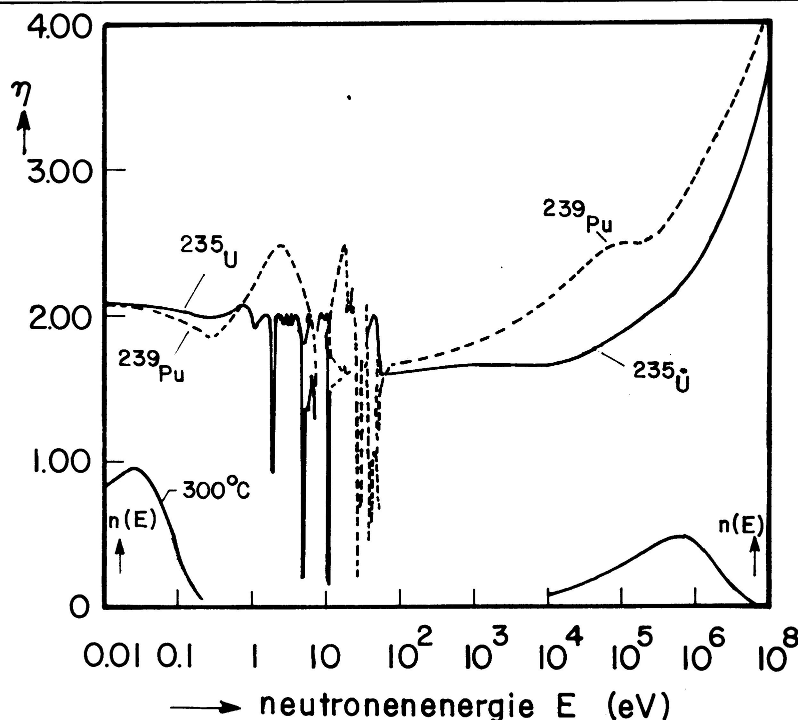


Fig. 6. De reproduktiefactor η als functie van de neutronenenergie voor U-235 en Pu-239. Linksonder een spectrum van gethermaliseerde neutronen bij een omgevingstemperatuur van 300 °C. Rechtsonder het spectrum van de neutronen die bij splijting vrijkomen.

van het natuurlijke uranium kan dan het vijftigvoudige bedragen van dat voor een licht-waterreactor!
In die situatie dient de reproduktiefactor $\eta > 2$ te zijn, daar per in de splijtstof geabsorbeerde neutron er één nieuw neutron nodig is voor voortzetting van de kettingreactie en één voor vorming van een Pu-kern. Bovendien moet gecompenseerd worden voor lek en parasitaire absorptie. Voor een thermische reactor is deze situatie niet te realiseren, zelfs niet met zuiver U-235 als splijtstof ($\eta = 2{,}07$). In *fig. 6* is de reproduktiefactor uitgezet als functie van de neutronen-energie. Hieruit blijkt dat kweken wel mogelijk is, mits de neutronen niet worden afgeremd maar een 'snel' spectrum behouden. Met Pu-239 als splijtstof gaat dit zelfs nog effectiever dan met U-235. In een snelle reactor is er dan ook geen moderator en kiest men vloeibaar natrium als koelmiddel. Daar voor de snelle neutronen de werkzame doorsneden klein zijn, moet er een voldoend hoge concentratie van splijtbare kernen zijn; dit vereist 10 tot 20% Pu-239 of U-235 in de splijtstof.

Snelle kweekreactoren zijn in verschillende landen gerealiseerd als demonstratiereactor met een elektrisch vermogen van 250 à 300 MWe. Een politiek minder geslaagd voorbeeld is de SNR te Kalkar, die vrijwel gereed is maar waarvan nog steeds niet zeker is of deze in gebruik zal worden genomen. In Frankrijk is sinds kort de Superphénix-centrale in bedrijf, met een commerciële grootte van 1200 MWe. In de centrale zone van de kern van een kweekreactor zal de conversie- of kweekfactor ongeveer 1 zijn. Door deze zone te omgeven met een kweekmantel bestaande uit (eventueel verarmd) uranium, is een gemiddelde kweekfactor van 1,2 à 1,3 realiseerbaar.

Door het gebruik van vloeibaar natrium als koelmiddel kan men bij hogere temperaturen werken dan in een lichtwaterreactor, zodat met een snelle kweekreactor een thermisch rendement van de elektriciteitsproduktie van 42% wordt bereikt, wat vergelijkbaar is met dat van een moderne conventionele centrale.

Opgesteld vermogen

Tabel 2 geeft een overzicht van het opgestelde en in aanbouw zijnde vermogen aan kernenergiecentrales per land. Thans zijn in 26 landen kernenergiecentrales in gebruik. Over de gehele wereld gerekend komt ca. 15% van alle opgewekte elektriciteit uit kernenergie. Per land kan dit percentage sterk afwijken. In de Verenigde Staten, waar de kernenergie het eerst tot ontwikkeling is gekomen, is het nucleaire aandeel in de elektriciteitsopwekking 16% en zal dit de komende jaren tot ca. 20% stijgen. In Frankrijk is in 1970 een ambitieus plan gestart om de elektriciteitsproduktie onafhankelijk te maken van olie. Inmiddels wordt hier meer dan 70% van alle elektriciteit door kernenergie opgewekt en is Frankrijk toonaangevend geworden op kernenergiegebied. De keuze van één reactortype (PWR), de

Tabel 2. Opgesteld nucleair vermogen ultimo 1986.

Land	In gebruik Aantal	In gebruik Vermogen (MWe)	In aanbouw Aantal	In aanbouw Vermogen (MWe)	Percentage nucleair opgewekte elektriciteit (1985)
Argentinië	2	935	1	692	10
België	7	5 414	–	–	58
Bondsrepubliek	20	17 615	5	5 383	31
Brazilië	1	626	1	1 245	2
Bulgarije	4	1 632	2	1 906	32
Canada	16	9 776	6	4 789	13
China	–	–	3	2 100	–
Cuba	–	–	2	816	–
DDR	5	1 694	6	3 432	12
Filippijnen	–	–	1	620	–
Finland	4	2 310	–	–	38
Frankrijk	49	44 890	13	16 050	65
Hongarije	3	1 200	1	400	24
India	6	1 240	4	880	2
Italië	3	1 273	4	4 000	5
Japan	33	23 665	15	14 330	22
Joego-Slavië	1	632	–	–	6
Korea	6	4 520	4	2 900	26
Mexico	–	–	2	1 308	–
Nederland	2	506	–	–	6
Pakistan	1	125	–	–	1
Polen	–	–	2	800	–
Roemenië	–	–	3	1 980	–
Spanje	8	5 520	2	2 023	22
Taiwan	6	4 918	–	–	53
Tsjecho-Slowakije	7	2 800	9	5 600	15
USA	97	82 408	22	24 688	16
USSR	57	33 750	29	26 600	10
Verenigd Koninkrijk	35	8 350	7	4 200	22
Zuid-Afrika	2	1 800	–	–	4
Zweden	12	9 525	–	–	42
Zwitserland	5	2 920	–	–	39
Totaal	392	270 044	144	126 742	15

Type	In gebruik		In aanbouw	
	Aantal	Vermogen (MWe)	Aantal	Vermogen (MWe)
PWR	214	163 690	104	95 803
BWR	81	62 819	15	14 683
HWR	20	11 456	11	6 361
CGR	40	10 638	7	4 200
HTR	3	639	–	–
FBR	7	2 654	3	1 435
RBMK	25	17 899	4	4 350
Overige	2	240	–	–
Totaal	392	270 044	144	126 742

Tabel 3. Verdeling van kernenergiecentrales naar type.

vergaande standaardisatie en de continuïteit in de bouw van centrales hebben hier zeker aan bijgedragen. Ook bij onze zuiderburen is de toepassing van kernenergie ver voortgeschreden. In de Bondsrepubliek Duitsland, en in Japan staat ook een groot vermogen aan kernenergiecentrales opgesteld, zonder dat dit evenwel tot een hoog percentage nucleaire elektriciteitsopwekking heeft geleid.

Engeland heeft zeer lang vastgehouden aan reactoren met gaskoeling. Niettemin bleek het ontwikkelingspotentieel hiervan te beperkt en wordt er gedacht aan de bouw van een PWR met Amerikaanse steun. Ook in de Sovjet-Unie wordt kernenergie op grote schaal toegepast, terwijl de overige Oost-Europese landen in verschillende mate volgen.

Tabel 3 geeft een overzicht naar type reactor. Daaruit blijkt de licht-waterreactor onbetwist de leider, met een ruime voorsprong voor de PWR. Overigens zijn er geen doorslaggevende technische, economische of veiligheidsoverwegingen voor deze laatste voorkeur te geven.

Nederland

Kort na de oorlog werd de ontwikkeling van de kernenergie in Nederland voortvarend aangepakt. Samen met Noorwegen werd een zwaar-waterreactor gebouwd met uranium dat tijdens de oorlog voor de Duitsers verborgen is gehouden in de Technische Hogeschool Delft. Ook werd de Noors-Nederlandse reactorschool opgericht, waar vrijwel alle werkers van het eerste uur hun opleiding hebben ontvangen. In 1955 werd het Reactor Centrum Nederland te Petten opgericht, waar o.a. een drukwaterreactor voor voortstuwing van koopvaardijschepen werd ontworpen. De elektriciteitsbedrijven kregen ook belangstelling voor kernenergie en bij de KEMA werd een fysisch zeer interessant reactortype ontwikkeld: de suspensiereactor[2]. De ontwikkeling van een reactortype ging echter de krachten van ons land te boven, en na het kortstondig bedrijf van een proefreactor is deze ontwikkeling gestopt. Wel besloten de elektriciteitsbedrijven gezamenlijk een reactor te bestellen met een gering vermogen om ervaring op te doen met de bouw en het beheer van een kernenergiecentrale. Dit werd de 54 MWe kokend-waterreactor te Dodewaard, die na een bouwtijd van vier jaar in 1969 in gebruik werd genomen. Kort hierna besloot het provinciale Zeeuwse elektriciteitsbedrijf een volledig commerciële centrale bij Borssele te laten bouwen, met een vermogen van 452 MWe. Beide centrales kunnen bogen op zeer gunstige beschikbaarheidscijfers en kunnen technisch bezien nog 10 à 15 jaar mee.

Tegelijk met de ingebruikstelling van de centrale te Borssele brak de oliecrisis uit, waarop het kabinet Den Uyl een jaar later voorstelde drie nieuwe kernenergiecentrales te bouwen. Maar de maatschappelijke tegenstand tegen kernenergie was in Nederland inmiddels zo sterk gegroeid, dat dit besluit nooit is uitgevoerd. Na jaren van besluiteloosheid werd de Brede Maatschappelijke Discussie georganiseerd als mogelijke uitweg. Ondanks de aanbeveling van de stuurgroep die de discussie organiseerde, voorlopig geen nieuwe kernenergiecentrales te bouwen, stelde de regering Lubbers in 1985 toch voor ten minste twee centrales te bouwen. Maar juist voordat offertes voor een centrale zouden worden aangevraagd, gebeurde het ongeluk in Tsjernobyl en werden de plannen opgeschort. Nieuwe studies werden aangekondigd op basis waarvan de regering in het voorjaar van 1988 opnieuw met een standpuntbepaling zal komen.

De huidige controverse

Er is vrijwel geen facet van kernenergie dat niet als strijdpunt in de discussie tussen voor- en tegenstanders heeft gefungeerd. Niettemin mag men thans stellen dat de strijd over de meeste technisch-economische punten beslecht is. De effecten van ioniserende straling, de lozingen van radioactiviteit bij normaal functioneren van kerncentrales, de voorraden uranium en de vraag of een kernenergiecentrale wel meer energie oplevert dan voor zijn bouw, bedrijf en afbraak nodig is, zijn geen belemmering voor kernenergie. De discussie over het mogelijke proliferatiegevaar van kernreactoren en de splijtstofcyclus lijkt, na het terugbrengen tot reële proporties, een langzame dood gestorven te zijn, al dient gezegd te worden dat sommige activiteiten van enkele derde-wereldlanden in de splijtstofcyclus vanuit dit oogpunt met enige argwaan bekeken moeten worden. Volop in de belangstelling staan nog steeds de vragen betreffende de veiligheid van kernenergiecentrales, de uiteindelijke opslag van radioactief afval en sinds de prijsdaling van de olie ook weer de kosten van kernenergie.

Het is ondoenlijk in een artikel als dit een afdoende schets te geven van alle argumenten die in deze discussies naar voren worden gebracht. Er zal worden volstaan met een schets van de stand van zaken ten aanzien van deze onderwerpen.

Veiligheid

De ernstigste situatie die zich in een kernreactor kan voordoen, is het smelten van de splijtstof, waardoor grote hoeveelheden radioactief materiaal kunnen vrijkomen. Dit kan zich voordoen bij het wegvallen van de koeling van de splijtstof. In dat geval is de kettingreactie snel gestopt, maar daarna moet nog lange tijd de vervalwarmte van de splijtingsprodukten worden afgevoerd. Om smelten van de splijtstof te voorkomen zijn tal van beveiligingen ingebouwd, en indien deze alle zouden falen moet het insluitingssysteem ervoor zorgen dat het radioactief materiaal zich niet in de omgeving kan verspreiden. Nochtans is dat niet volledig uit te sluiten. Voor een beoordeling van de veiligheid van kernenergiecentrales maakt men gebruik van een methodiek, gebaseerd op waarschijnlijkheidsrekening, om de kans op allerlei gebeurtenissen en falen van beveiligingen te bepalen. Deze methodiek is thans algemeen aanvaard en wordt ook buiten de kernenergie steeds meer toegepast. Uit dergelijke veiligheidsstudies blijkt dat kernenergie een relatief veilige bedrijfstak is. Toch blijft een steeds weer terugkerende vraag: welk risico is maatschappelijk aanvaardbaar? Ervan uitgaande dat geen enkele maatschappelijke of industriële activiteit een kans nul op een ongeval heeft, moet in vergelijking met risico's van andere activiteiten een grens gevonden worden waar beneden het risico als acceptabel beschouwd kan

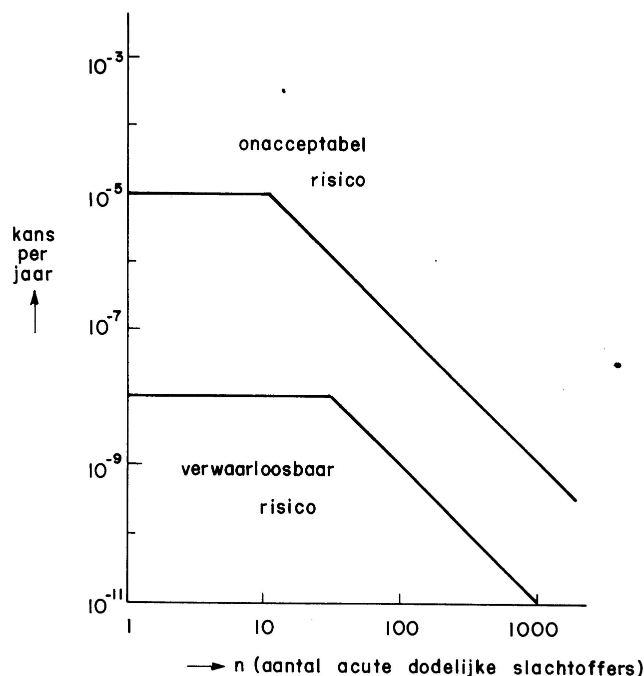


Fig. 7. Mogelijke risicogebieden bij verschillende kans per jaar op een ongeval met *n* of meer acute dodelijke slachtoffers. Over het gebied tussen de getrokken lijnen dient per geval verdere discussie gevoerd te worden.

worden. Men zou dan voor risico's waar burgers onvrijwillig aan worden blootgesteld, tot een voorstelling kunnen komen als is weergegeven in *fig. 7*. Risico's boven de bovenste lijn worden onaanvaardbaar geacht. Risico's beneden de onderste lijn zijn zo gering, dat zij in vergelijking met andere risico's niet meer van belang kunnen zijn. Daar tussenin bevindt zich nog een gebied dat verdere discussie nodig maakt en waarbij men wellicht voor verschillende activiteiten tot verschillende conclusies komt. Merk op dat het risico, uitgedrukt als kans × gevolg, langs beide getrokken schuine lijnen niet constant is, maar afneemt bij ernstiger gevolgen. Dit komt overeen met het algemeen menselijk gevoelen dat ongevallen waarbij in één keer een groot aantal slachtoffers zijn te betreuren, als ernstiger worden ervaren dan ongevallen met één of enkele slachtoffers per keer, ook al overlijden er gemiddeld per jaar aan beide soorten ongevallen evenveel personen. Uiteraard is risicoperceptie en risicowaardering door mensen veel complexer dan hier geschetst. Niettemin moet het voor een overheid mogelijk zijn risico-acceptatiecurven te definiëren en dat is deels ook al gebeurd.

Afval

De veel gehoorde klacht 'het probleem van het radioactief afval is nog niet opgelost' vindt zijn grond in het ontbreken van definitieve opslagfaciliteiten. Door de relatief geringe hoeveelheden kernsplijtingsafval zijn er echter geen technische redenen haast te maken met de aanleg van een dergelijke faciliteit. Gedetailleerde ontwerpen van de aanleg van een opslagplaats in b.v. een zoutformatie tonen aan, dat de hiervoor benodigde techniek voorhanden is en de kosten geen belangrijke verhoging van de opwekkingskosten van elektriciteit uit kernenergie met zich meebrengen, daar in zo'n opslagplaats het afval van vele centrales voor vele jaren kan worden opgeslagen. Ondertussen kan het onderzoek naar het gedrag van radioactief afval in de beoogde geologische formatie en de eigenschappen daarvan onder invloed van warmte- en stralingsbelasting voortgaan. Er is echter geen reden de mogelijkheid van definitieve opslag in b.v. zouformaties in twijfel te trekken, indien een geschikte formatie gevonden kan worden.

Kosten

De opwekkingskosten van elektriciteit uit kernenergie zijn met ervaringscijfers voor de bouwkosten van een centrale, de bouwtijd, de beschikbaarheidsgraad enz. vrij goed te voorspellen. Minder zekerheid is er over de uraniumprijs voor de gehele levensduur van de centrale. Doordat de kostprijs van elektriciteit uit kernenergie ruwweg voor 2/3 bestaat uit kapitaallasten en voor 1/3 uit jaarlijks terugkerende splijtstof- en onderhoudskosten, is de brandstofprijs voor kernenergie veel minder belangrijk dan voor conventionele centrales, waar de variabele lasten ca. 2/3 van de prijs uitmaken. Ook met de lage olieprijzen blijft kernenergie relatief goedkoop. De marge ten opzichte van kolen is echter klein geworden.

Vooruitzichten voor kernenergie

De toekomst van kernenergie op korte termijn wordt vooral bepaald door de mate van maatschappelijke acceptatie. Op de lange termijn zal het primair van een afweging van voor- en nadelen ten opzichte van die van andere energiebronnen afhangen of kernenergie een belangrijke plaats zal innemen in de elektriciteitsproduktie in de wereld. Omdat de auteurs van de zeven 'Opinies' zich met deze vragen hebben beziggehouden, wil ik mij beperken tot een opinie over de technische vooruitzichten voor toepassing van kernenergie op lange termijn.

De technologie van licht-waterreactoren is thans een 'bewezen' technologie. Door voortdurende verbetering van reactorontwerp en splijtstofbeheer, waarvoor de reactorfysica een onmisbare pijler is, zal dit type kernreactor voorlopig concurrerend kunnen blijven. Ondanks het veel gunstiger splijtstofverbruik van kweekreactoren zullen deze pas een doorslaggevende rol gaan spelen wanneer de kostprijs van uranium zo sterk gestegen is (door uitputting van relatief voordelig te exploiteren voorraden) dat de gecompliceerdere splijtstofcyclus van de kweekreactor lonend wordt. Dit is echter de eerste decennia niet te verwachten. Op (zeer) lange termijn is het duidelijk dat kernenergie is aangewezen op de kweekreactor. Wat andere reactortypen betreft mag men verwachtingen hebben van de hoge-temperatuurreactor met gaskoeling. De ervaring heeft echter geleerd dat het een lange weg is naar commerciële introductie van een nieuw reactortype op enige schaal.
De kostprijs van nucleair opgewekte elektriciteit zal, afgezien van de algemene prijsontwikkeling, vermoedelijk nog enigszins stijgen door hogere kosten in de 'staart' van de splijtstofcyclus en de ontmanteling van centrales. Daar vergelijkbare effecten zich ook bij steenkool zullen voordoen, hoeft dit de concurrentiepositie van kernenergie niet aan te tasten. De mogelijkheid van laserverrijking zal de prijs van verrijkt uranium niet verlagen.

Aan de veiligheid van kerncentrales zal voortdurend verdere aandacht worden besteed, zodat het totale risico geringer zal worden. De gevolgen van het ongeval in Tsjernobyl zullen van invloed zijn op wat maatschappelijk aanvaardbaar is, ook wat andere schade betreft dan leven en gezondheid van de directe slachtoffers. Het belang van de interactie tussen mens en machine wordt volledig onderkend en hier zijn nog belangrijke verbeteringen mogelijk. De nadruk op inherent veilige mechanismen zal toenemen. Het is echter de vraag of

volledig hierop ontworpen reactoren (zie het artikel van Oosterkamp op blz. 68) daarvoor noodzakelijk zijn. Door de grotere veiligheid en het uitkristalliseren van normen voor veiligheidsrisico's waaraan kernenergiecentrales kunnen voldoen, zal het vinden van voldoende vestigingsplaatsen geen probleem vormen. De thans reeds zichtbare ontwikkeling van toepassing van warmteproduktie uit kernenergiecentrales voor stadsverwarming en industriële warmte kan zich dan voortzetten.

Voor het verwerken van radioactief afval zullen de methoden ongetwijfeld sterk verbeteren. Het is zelfs niet ondenkbaar dat thans nog niet bekende methoden ontdekt worden om radioactiviteit anders dan door verval te doen verdwijnen of verminderen.

Of al deze verbeteringen voldoende zullen zijn voor toepassing van kernenergie op lange termijn, zal echter ook afhangen van de mogelijkheden die andere, wellicht thans nog onbekende, energiebronnen voor elektriciteitsproduktie dan zullen hebben. Dat de kernsplijtingsenergie overvleugeld zal worden door kernfusie-energie waag ik te betwijfelen.

Referenties

1. S. Glasstone and M.C. Edlund, The Elements of Nuclear Reactor Theory, Van Nostrand Company, New York, 1952.
2. Zie b.v. J. Kuypers, De KEMA Suspensie-test-reactor, in C.D. Andriesse en A. Heertje (red.), Kernenergie in beweging. Handboek bij vraagstukken over kernenergie, Keesing Boeken, Amsterdam, 1982.

Verdere literatuur

Over centrales: F.J. Rahn, A.G. Adamantiades, J.E. Kenton and C. Braun, A Guide to Nuclear Power Technology, John Wiley & Sons, New York, 1984.
Over veiligheid: B.Th. Eendebak, Reactorveiligheid in Nederland, Kluwer, Deventer, 1983.
Over het afvalprobleem: Verworvenheden bij opwerking en opslag kernsplijtingsafval, Verslag symposium 29 september 1981, 's-Gravenhage, Afdeling voor Kerntechniek, Koninklijk Instituut van Ingenieurs, 1981.
Over de opwekkingskosten van elektriciteit: De kosten van elektriciteit opgewekt met kernenergie in Nederland, Koninklijk Instituut van Ingenieurs, 's-Gravenhage, 1982.

Ontwikkelingen in de reactorfysica

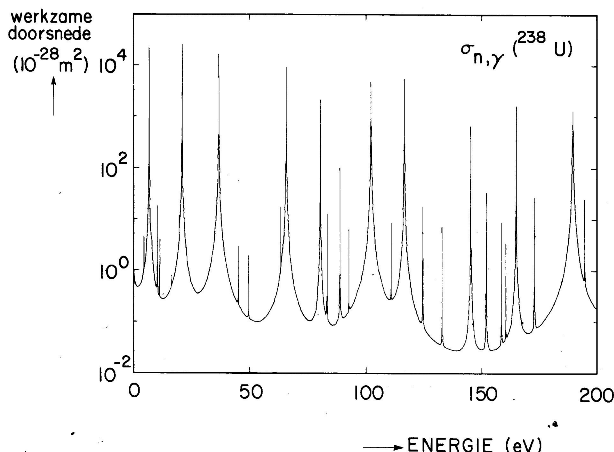
H. van Dam

De reactorfysica werd geboren toen enkele maanden na de ontdekking van kernsplijting (eind 1938) het verschijnsel van neutronenvermenigvuldiging werd aangetoond: bij kernsplijting bleken gemiddeld twee à drie neutronen vrij te komen. Dit verschijnsel opende de mogelijkheid dat onder goed gekozen omstandigheden een zichzelf onderhoudende kettingreactie van splijtingen zou optreden waarmee grote hoeveelheden energie zouden kunnen worden vrijgemaakt. Om die 'goed gekozen omstandigheden' te vinden, moest het gedrag van vrije neutronen in media met splijtstof worden bestudeerd, waarmee het werkterrein van de reactorfysica gegeven was. Een iets vollediger definitie van dit vakgebied zou kunnen luiden: de bestudering van het gedrag van vrije neutronen in al of niet vermenigvuldigende media alsmede van alle eigenschappen van en verschijnselen in die media die in verband staan met het neutronengedrag. Welke ontwikkelingen vonden er in de afgelopen 50 jaren plaats? Wat is de huidige situatie en welke ontwikkelingen zijn te verwachten?

Grondslag en problemen

Het fundament van de reactorfysica wordt gevormd door de neutronentransportvergelijking (zie kader). De oplossing van deze vergelijking in algemene vorm stelt ons voor formidabele problemen. In de eerste plaats is het aantal onafhankelijk variabelen groot, en wel zeven in totaal: drie voor de plaatscoördinaten, twee voor de richting waarin de neutronen zich bewegen, één voor de energie en één voor de tijd. In de tweede plaats is het domein van de energievariabele bijzonder breed. Verreweg de meeste reactoren zijn van het thermische type, d.w.z. dat de bij splijting vrijkomende neutronen worden afgeremd tot zij bij benadering in thermisch evenwicht zijn met het medium. Dit betekent dat een energiegebied van 10 MeV tot 10^{-3} eV (d.w.z. 10 decaden!) moet worden onderzocht. De coëfficiënten in de transportvergelijking, de werkzame doorsneden, moeten over het gehele energiegebied bekend zijn. Zij kunnen sterk met de energie variëren; dit laatste doet zich vooral voor in het epithermische gebied (1 eV tot enkele keV), waar resonantieverschijnselen optreden in de neutronenreacties met zware kernen (*fig. 1*). Elk actinide heeft enige tientallen resonanties met een energiebreedte in de orde van 10 meV, zodat een sterke detaillering van het energiegebied noodzakelijk is. Daarbij komt nog als complicatie dat ten gevolge van de warmtebeweging van de atoomkernen een Doppler-verbreding van de pieken optreedt: een neutron dat in een vast coördinatensysteem een bepaalde energie heeft, zal ten opzichte van een kern met thermische

Fig. 1. De werkzame doorsnede van ^{238}U voor vangst van neutronen met een energie tussen 1 eV en 200 eV. De doorsnede vertoont vele resonatiepieken met een gemiddelde afstand in energie van ongeveer 20 eV en een breedte (op halve hoogte) in de orde van 0,1 eV. De werkzame doorsnede kan in een resonantiepiek een factor 10^4 toenemen; ten gevolge van thermische beweging van de kernen worden de pieken verlaagd en verbreed (Doppler-effect), een effect dat in de figuur niet in aanmerking is genomen.





Prof. dr. ir. H. van Dam (1940) promoveerde op een proefschrift over de experimentele en theoretische analyse van energieverdelingen van snelle neutronen. In 1971 werd hij lector in de reactorfysica aan de toenmalige Technische Hogeschool Delft en het Interuniversitair Reactor-Instituut, in 1980 hoogleraar. Als gevolg van de maatschappelijke implicaties van kernenergie raakte hij in de overheidssfeer betrokken bij vele adviserende activiteiten op het gebied van kernenergie en stralingshygiëne. Thans is hij onder meer lid van de Gezondheidsraad.

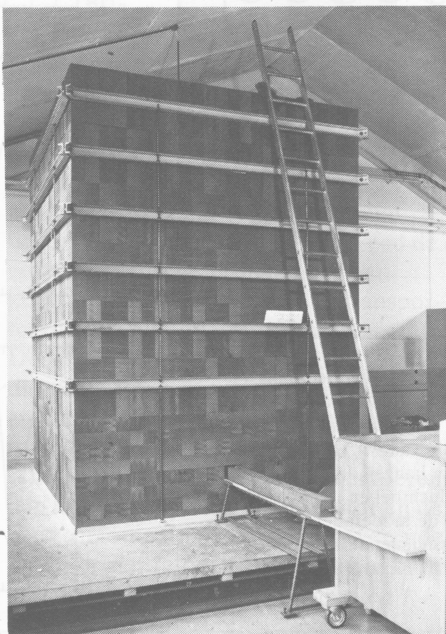
beweging een energiespectrum hebben met een breedte die van dezelfde orde is als de breedte van de resonantiepieken. Als gevolg hiervan wordt de interactiekans afhankelijk van de temperatuur, wat een belangrijk verschijnsel is in verband met reactorveiligheid. In het thermische gebied is de dynamica van de remstofatomen of -moleculen, te zamen met de absorptie-eigenschappen van de splijtstof, bepalend voor de vorm van het thermische spectrum. Ook hier treden weer temperatuureffecten op die voor het dynamisch gedrag van een reactor van groot belang zijn.

Een stukje historie

Het is duidelijk dat een zo gedetailleerde studie in de beginperiode volstrekt onmogelijk was: zelfs de noodzakelijke gegevens voor werkzame doorsneden ontbraken grotendeels. Veel informatie is verkregen uit zgn. 'integrale' experimenten, die op grond van globale fysische overwegingen werden opgezet. Beroemd in dit opzicht zijn de 'grafietzuilen' die de vader van de reactorfysica, Fermi, in 1941 en 1942 bouwde bij de Columbia Universiteit. In deze subkritieke ensembles van grafiet en natuurlijk uranium c.q. uraniumoxyde kon slechts een stationaire neutronenbevolking in stand worden gehouden met behulp van een externe neutronenbron. De ruimtelijke neutronenverdeling leverde echter waardevolle gegevens over de multiplicerende eigenschappen van de gekozen constructies. Het ging daarbij vooral om het zoeken naar de juiste verhouding tussen grafiet en uranium alsmede de optimale afmetingen van de uraniumbrokken (er waren nog geen staven beschikbaar). In juli 1942 werd met de 'intermediate pile nr. 9' het eerste bewijs geleverd dat door verdere uitbouw van de zuil een kritieke reactor zou ontstaan, wat uiteindelijk leidde tot succes toen op 2 december 1942 in het diepste geheim de eerste grafietreactor kritiek werd in een squashcourt onder de tribunes van het atletiekterrein van de Universiteit van Chicago. Deze reactor was de voorloper van de grote reactoren die te Hanford zijn gebouwd voor de productie van plutonium. De experimenten van Fermi gaven een funderend inzicht in de factoren die een rol spelen bij kettingreacties. In het kader van de opleiding van de eerste reactorfysische studenten in Delft werden zij twintig jaar later herhaald, zij het met veel mooier materiaal dan Fermi bezat (*fig. 2*). Zij vormen nog steeds een belangrijk onderdeel van een inleidend reactorfysisch practicum, zij het dat de wat omvangrijke grafietzuil vervangen is door een subkritiek waterreactortje van veel bescheidener afmetingen.

Vanaf het begin hebben twee zaken centraal gestaan in de reactorfysica: de ontwikkeling van methoden voor het benaderend oplossen van de neutronentransportvergelijking (waarbij de aard van de benadering wordt bepaald door de specifieke vraagstelling) en het ontwikkelen van meetmethoden en uitvoeren van experimenten om de berekeningen te verifiëren. Wat de rekenmethoden betreft, was er vooral in de beginperiode een sterke wederzijdse stimulering van rekenhulpmiddelen en reactorfysica. Zo werd de ontwikkeling van rekenautomaten en algorithmen sterk gestimuleerd door de reactorfysische eisen, aanvankelijk vooral voor het militaire onderzoek. Bij de ontwikkeling van de splijtingsbom speelden analytische berekeningen op de eerste IBM-machines een grote rol, bij de ontwikkeling van de waterstofbom zag de Monte Carlo-methode het levenslicht[1]. Ook hier te lande in Petten (ECN), Arnhem (KEMA) en Delft hebben de reactorfysische groepen al in een zeer vroeg stadium de mogelijkheden van computers aangegrepen.

Fig. 2. De grafietzuil van het Interuniversitair Reactor-Instituut Delft in 1960. De zuil bestond uit 27 ton grafiet en kon geladen worden met maximaal drie ton natuurlijk uranium, waarbij een vermenigvuldigingsfactor van 0,8 werd bereikt.



Rekenen en fysica

Door collega-fysici is de reactorfysicus soms ten aanzien van zijn rekenaktiviteiten met een scheef oog aangekeken: de 'ware fysica' zou zich nimmer bezighouden met deze omvangrijke berekeningen. De recente erkenning van het grote belang van 'computational physics' door de Verkenningscommissie Natuurkundig Onderzoek[2] is uiting van het feit dat in dit opzicht de laatste tien jaar iets is veranderd. Het blijft natuurlijk wel zaak om nimmer de fysica uit het oog te verliezen. Op dit punt waarschuwden Weinberg en Wigner[3] bijna dertig jaar geleden al: '(We have attempted) to resist what is surely a deplorable trend in reactor design – the tendency to substitute a 'code' for a theory, to substitute an oscilloscope (sic!) display of many curves for a detailed *physical* understanding of the system. Yet we believe strongly that only when there is a true understanding of the physical and analytical basis of a reactor calculation can the machine be used to full effect. In this way we may be regarded as old-fashioned; if so, let the new generation remember that the first full-scale reactors, Hanford, were designed with desk calculators and slide rules'.

Nauwkeurigheid

Er zit aan reactorfysische berekeningen nog een bijzonder aspect: de resultaten moeten een veel grotere nauwkeurigheid hebben dan men veelal in de technische wetenschappen gewend is. Zo moet een vermenigvuldigingsfactor van een reactor vaak binnen 1% nauwkeurig worden berekend. Een ander voorbeeld is de berekening van differentiële effecten zoals kleine verstoringen in procesparameters, waarvan de invloed op de vermenigvuldigingsfactor van de reactor wordt uitgedrukt in reactiviteitscoëfficiënten (zie het artikel van Oosterkamp, dit nummer blz. 68). Het betreft hier kleine effecten, waarbij al gauw een grote onnauwkeurigheid optreedt indien zij worden afgeleid uit verschillen tussen grote getallen. Om dit te omzeilen zijn zgn. verstoringstheorieën ontwikkeld, die gebruik maken van geraffineerde mathematische metho-

den[4], die het differentiële effect direct berekenen en zodoende het gevaar van onnauwkeurigheid, althans ten gevolge van het eerdergenoemde effect, vermijden. In de praktijk blijkt overigens dat fysici hun resultaten vaak als veel nauwkeuriger taxeren dan zij in feite zijn. Er worden regelmatig zgn. 'benchmark'-oefeningen gedaan, waarbij een groot aantal groepen over de gehele wereld rekent aan een zelfde probleem. De spreiding tussen de resultaten blijkt nogal eens groter te zijn dan de nauwkeurigheid die iedere groep voor haar eigen resultaten opgeeft. Dit overmatige vertrouwen van fysici is al veel eerder gebleken. Toen de eerste Hanford-reactor werd ontworpen, besloot een ingenieur om de reactor iets groter te maken dan de fysici hadden voorgeschreven[5]; hij deed dit zeer tegen de wens van de 'langharigen' (lees: fysici) in, maar voelde als echt ingenieur veel voor een veiligheidsfactor. Toen de fysici later tot hun schrik ontdekten dat de zgn. xenonvergiftiging (een afname van de vermenigvuldigingsfactor door de productie van het splijtingsproduct xenon-135, dat een zeer sterke neutronenabsorptie vertoont) veel groter was dan verwacht was, konden de reactoren toch op het ontwerpvermogen functioneren dank zij de ingebouwde reserve.

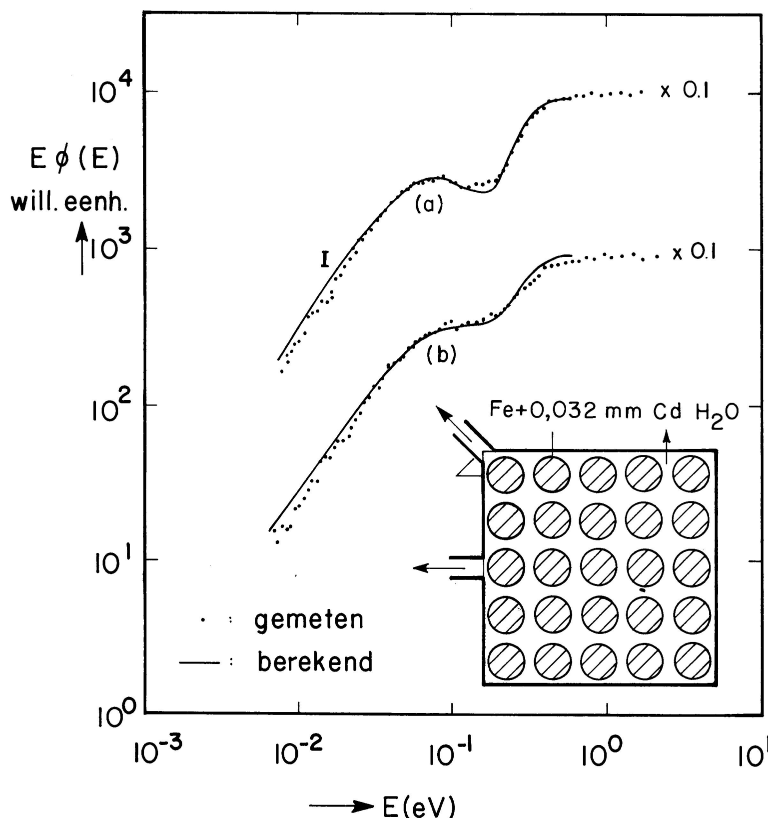
Experimenten

Op experimenteel gebied hebben vooral metingen aan subkritieke en kritieke ensembles met activeringsmethoden en methoden ter bepaling van reactiviteitseffecten een rol gespeeld. Plaatsafhankelijke neutronenspectrometrie is daarbij het beste hulpmiddel om het neutronentransport in detail te bestuderen. *Fig. 3* geeft daarvan een voorbeeld[6].

Naast het stationaire gedrag van de neutronenbevolking in een reactor hebben ook de tijdafhankelijke aspecten veel aandacht moeten krijgen. Dit gebeurde enerzijds met neutronenbronnen die oscilleren of pulsen afgaven, waarbij ook de golfeigenschappen van het neutronenveld interessant bleken als informatiebron van nucleaire parameters. Anderzijds zijn met veel succes stochastische methoden toegepast, gebruik makend van het inherent stochastische karakter van de kettingreactie; bij de neutronen variëren immers het geboorte-aantal per splijting, de individuele levensduren en ook de ruimtelijke migratie tussen geboorte- en sterfplaats. Dit veroorzaakt de zgn. nulvermogensruis, zo genoemd omdat hij inherent is aan het statistische karakter der neutroneninteracties en dus ook optreedt bij een verwaarloosbaar laag vermogen.

Een meer recent onderwerp is de zgn. vermogensruis, waarbij een sterke koppeling aanwezig is tussen neutronica en thermohydraulica, d.w.z. de neutronenbevolking wordt beïnvloed door temperatuureffecten, tweefasenstromingen en door stroming geïnduceerde trillingen en drukeffecten. De reactorfysicus heeft hier tot taak zoveel mogelijk fysische informatie over het verloop van de processen in de reactor uit de meet-

Fig. 3. Neutronenspectra in het thermische gebied, gemeten aan een gesimuleerde reactorcel bestaande uit ijzerstaafjes in water. De ijzerstaafjes simuleren uranium; de staafjes zijn bedekt met een zeer dun laagje cadmium, dat plutonium simuleert. Door de neutronenabsorptie ontstaat een sterke vervorming ten opzichte van een Maxwell-Boltzmann-spectrum[6].



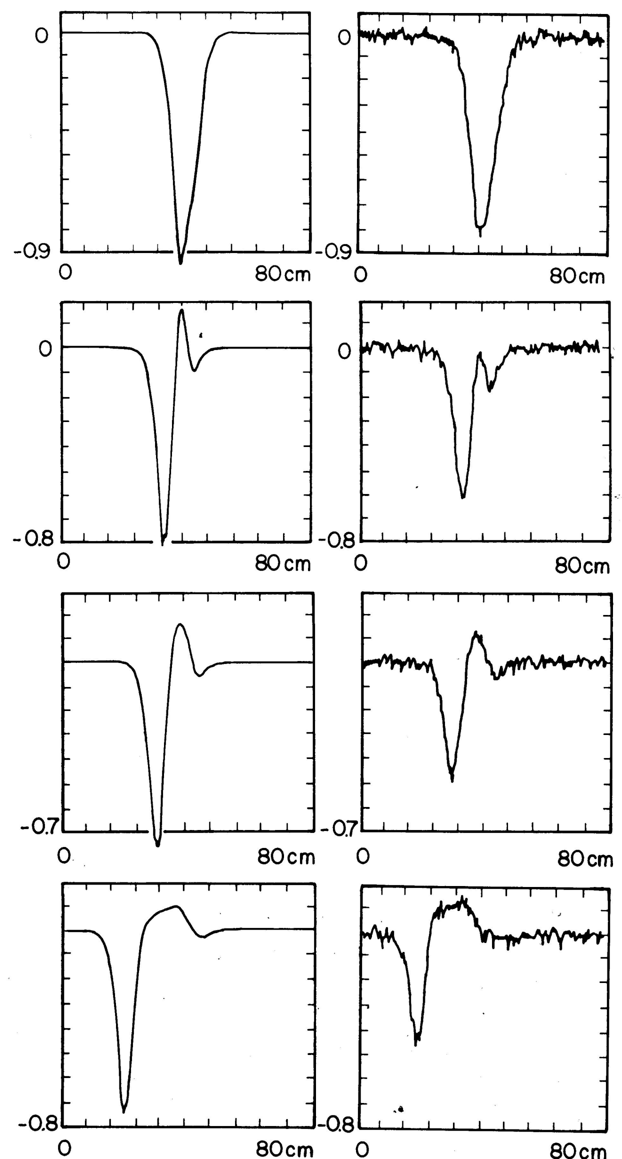


Fig. 4. Signaal van een neutronendetector bij passage van een luchtbel (links berekend, rechts gemeten in een subkritiek ensemble). De passerende luchtbel verstoort het neutronenveld in zijn omgeving en in zekere mate over de gehele reactorkern. Deze verstoring is een combinatie van wijzigingen in absorptie, moderatie en stroming van neutronen; hierdoor hangen de grootte en vorm van het detectorsignaal af van de posities van luchtbel en detector alsmede van de energiegevoeligheid van de detector en de moderatieverhoudingen in het reactorrooster. Door analyse van deze basissignalen werd inzicht verkregen in het spectrum van de neutronenruis die ontstaat bij stroming van een tweefasenmengsel door een reactorkern[8].

signalen te halen (*fig. 4*). Daarbij speelt de dynamica van het neutronen- en gammatransport in de reactor een rol; dit transport is immers de 'boodschapper' tussen veld en detector[7, 8]. In verband met de koppeling tussen neutronica en thermohydraulica is kennis van de eerdergenoemde reactiviteitscoëfficiënten essentieel. Voor meer gegevens over onderzoek aan vermogensruis zij verwezen naar het artikel van Türkcan (dit nummer blz. 73).

Quo vadis

Mede als gevolg van de grote ontwikkelingen op het gebied van computers ligt bij de huidige reactorfysica een sterk accent op het gebruik van deze mogelijkheden voor een nauwkeurige simulatie van het reactorproces. Hierbij moeten met name methoden voor driedimensionale berekeningen van reactorkernen met zo goed mogelijk in rekening brengen van de geometrische details worden genoemd. Zij spelen een rol bij de optimalisatie van reactorbedrijfsvoering, waarmee nog steeds veel geld kan worden bespaard.

Op het gebied van reactortypen zijn er drie ontwikkelingen die een reactorfysische inspanning eisen: evolutie van snelle reactoren, ontwerp van geavanceerde lichtwaterreactoren met een verbeterd splijtstofgebruik (d.w.z. beter gebruik van de oorspronkelijke grondstof, het natuurlijke uranium) en concepten voor 'inherent veilige' reactoren; het laatste onderwerp wordt mede ingegeven door de kritische houding van de samenleving tegenover kernenergie. Voorts is er nog wel eens een 'wild idee', zoals de gaskern-reactor van Kistemaker (dit nummer blz. 95), die een speciale reactorfysische aanpak vereist[9].

Ten slotte moet nog worden vastgesteld dat reactorfysica, zeer ten onrechte, meestal uitsluitend in verband wordt gebracht met kern*splijting*. Dat ook bij kern*fusie* nog heel wat reactorfysica komt kijken is echter evident. Het plasma laten we over aan de plasmafysici, maar de neutronendiagnostiek is een stukje reactorfysica bij uitstek; bij het huidige JET-project worden hiervan fraaie staaltjes vertoond[10]. De rol van reactorfysica wordt nog belangrijker als we het stadium bereiken van een fusiereactor met tritiumkweekmantel. De optimale dimensionering van deze mantel en zijn afscherming zijn opgaven die met de gereedschappen van de reactorfysica moeten worden opgelost. Dit geldt nog sterker als men hybride systemen beschouwt[11], waarbij rond de torus met het fusieplasma een mantel wordt geplaatst waarin splijtstof wordt gekweekt en tevens een aanzienlijke bijdrage aan de energieproductie wordt geleverd. De reactorfysica kan nog niet op haar lauweren gaan rusten.

De vergelijkingen voor het neutronentransport

Het gedrag van een kernreactor wordt bepaald door de plaats- en tijdafhankelijke reactietempi van neutronen en atoomkernen. Om deze tempi te bepalen, moeten onderstaande partiële differentiaalvergelijkingen voor de fluxdichtheid van de neutronen worden opgelost:

$$\left[\frac{1}{v}\frac{\partial}{\partial t} + \Omega \cdot \boldsymbol{\nabla} + \Sigma_t(\boldsymbol{r},E)\right]\phi(\boldsymbol{r},E,\Omega;t) =$$

$$= \int_{4\pi} \mathrm{d}\Omega' \int_0^\infty \mathrm{d}E'\, \Sigma_s(\boldsymbol{r};E'\Omega' \rightarrow E\Omega)\phi(\boldsymbol{r},E',\Omega';t) +$$

$$+ (1-\beta)\,\frac{\chi_p(\boldsymbol{r},E)}{4\pi} \int_0^\infty \mathrm{d}E'\nu\,\Sigma_f(\boldsymbol{r},E') \int_{4\pi} \mathrm{d}\Omega\,\phi(\boldsymbol{r},E',\Omega;t) +$$

$$+ \sum_i \lambda_i \frac{\chi_i(\boldsymbol{r},E)}{4\pi} C_i(\boldsymbol{r};t) + S(\boldsymbol{r},E,\Omega;t). \qquad (1)$$

en

$$\frac{\partial C_i(\boldsymbol{r};t)}{\partial t} = -\lambda_i C_i(\boldsymbol{r};t) + \beta_i \int_0^\infty \mathrm{d}E'\nu\,\Sigma_f(\boldsymbol{r},E') \int_{4\pi} \mathrm{d}\Omega\,\phi(\boldsymbol{r},E',\Omega;t). \qquad (2)$$

Hierin is:

- v snelheid.
- t tijd.
- E energie.
- Ω voortbewegingsrichting.
- ϕ fluxdichtheid.
- Σ macroscopische werkzame doorsnede (t = totaal, f = splijting, s = verstrooiing).
- β_i = fractie nakomende neutronen van groep i.
- χ = spectrum van splijtingsneutronen (p = prompt, i = nummer van de nakomende groep).
- C_i = concentratie moederkernen van groep i.
- λ_i = desintegratieconstante van moederkernen van groep i.
- S = externe neutronenbron.

Vergelijking (1) is een neutronenbalans. Geheel links het neutronen-'saldo', tot uiting komend in toe- of afname van de bevolking. Daarna twee verliestermen voor resp. stroming en kernreacties (incl. verstrooiing). Rechts alle bronnen: verstrooiing vanuit andere energieën en richtingen, productie door splijtingen, productie van zgn. nakomende neutronen en ten slotte een eventuele 'externe' (dat wil zeggen: van de flux onafhankelijke) neutronenbron.

De op een na laatste term is een bijzondere: zij drukt uit dat bij splijting niet alle neutronen onmiddellijk vrijkomen maar dat een deel bestaat uit 'nakomertjes' bij het verval van bepaalde splijtingsproducten. Vele tientallen splijtingsproducten vertonen neutronenemissie (zgn. 'moederkernen'), maar zij worden veelal gerangschikt in zes groepen. De gemiddelde vertragingstijd is ongeveer 10 s; dank zij dit verschijnsel is een kernreactor goed regelbaar.

De tweede vergelijking is een balans tussen productie en verval van moederkernen en is uiteraard gekoppeld aan de eerste. Zoals hier weergegeven, lijken de vergelijkingen lineair. Doordat de werkzame doorsneden, die als coëfficiënten in de vergelijkingen optreden, op een gecompliceerde wijze afhangen van de neutronenenergie, is analytische oplossing niet mogelijk.

Referenties

1. R.G. Hewlett and F. Duncan, Atomic Shield, 1947/1952 Volume II. A History of the United States Atomic Energy Commission, Pennsylvania State Univ. Press, 1969.
2. Natuurkunde in Nederland; overzicht en vooruitzicht. Rapport van de Verkenningscommissie Natuurkundig Onderzoek, publikatie van het Ministerie van Onderwijs en Wetenschappen, 1984.

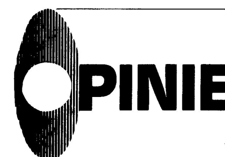
Kanttekeningen bij de noodzaak en wenselijkheid van kerncentrales

Terecht heeft het ongeluk met de kerncentrale in Tsjernobyl in ons land geleid tot een herbezinning op de wenselijkheid en de mogelijkheid van de toepassing van kernenergie bij het opwekken van elektriciteit. Slechts indien de veiligheid wordt gewaarborgd, zo liet de Tweede Kamer weten, mag kernenergie worden toegepast. Daarmee kwam zij terug op een eerder, in 1985 genomen besluit akkoord te kunnen gaan met de vestiging van ten minste twee nieuwe kerncentrales, mits er voor de opslag van het kernafval een aanvaardbare (eventueel tijdelijke) oplossing zou worden gevonden.

Beschouwen we de besluitvorming in Den Haag wat nader, dan blijkt dat in 1985 twee overwegingen een doorslaggevende rol hebben gespeeld in de standpuntbepaling pro kernenergie, te weten kosten en milieu.
Twee jaar geleden was de meerderheid in de Tweede Kamer ervan overtuigd dat een elektriciteitsproductiepark mèt kerncentrales aanmerkelijk goedkoper stroom zou kunnen produceren dan een park zónder kerncentrales. Voor de concurrentiepositie van de Nederlandse industrie was het derhalve noodzakelijk ook in ons land, net als in landen als West-Duitsland, België en Frankrijk, over 'atoomstroom' te kunnen beschikken.
Met betrekking tot het milieu was men van mening dat de inzet van kernenergie een belangrijke bijdrage zou kunnen leveren in het bestrijden van zure neerslag – de lozing van SO_2 en NO_x zou er immers door verminderen – en in het oplossen van het zgn. CO_2-probleem (broeikas-effect). Natuurlijk stonden daar onder meer de milieu-effecten van een ernstig ongeval met een kerncentrale tegenover, maar daarover waren diverse deskundigen in ons land van mening dat deze effecten minimaal zouden zijn. De kans op een zgn. kernsmeltingsongeval was vrijwel te verwaarlozen, acute slachtoffers zouden er bij zo'n ernstig ongeval niet vallen en de besmetting van het gebied rondom de reactor zou dermate beperkt en kortstondig zijn, dat op grond van dit aspect nauwelijks een voorkeur viel uit te spreken voor een bepaalde vestigingsplaats (zie ook het KEMA-rapport 'Milieu-effecten na een ongeval met een kernenergiecentrale', oktober 1985).
Als enig bezwaar tegen de vestiging van kerncentrales bleef derhalve over dat een verantwoorde opslag van het radioactieve afval nog niet geheel was gegarandeerd.

De herbezinning op de mogelijkheid en de wenselijkheid van het toepassen van kernenergie die na Tsjernobyl op gang is gekomen, dient naar mijn mening ook in te houden dat de hierboven genoemde overwegingen kritisch worden geëvalueerd in het licht van recente inzichten en gegevens. Mijnerzijds zou ik bij de overwegingen de volgende kanttekeningen willen plaatsen.

Allereerst de vraag of een elektriciteitsvoorzieningssysteem mèt kerncentrales goedkoper stroom produceert dan een systeem zónder. Voor het antwoord op deze vraag richten we ons op het jaar 2010 en nemen we aan dat tegen die tijd 5000 à 6000 MW kernvermogen moet kunnen zijn geïnstalleerd. Het zal overigens duidelijk zijn dat vele factoren de te verwachten kostprijs van stroom in 2010 bepalen. Meer in het bijzonder spelen een rol het prijzenpad dat energiedragers zullen volgen, de hoogte van de investeringskosten van met name kerncentrales, en de kosten voor bediening en onderhoud van de diverse productie-eenheden. Door het Ministerie van Economische Zaken zijn hieromtrent de afgelopen paar jaar veronderstellingen geuit. Nemen we deze over, dan kan met behulp van simulatiemodellen (waarover wij in Utrecht beschikken) worden berekend dat in 2010 de productiekosten van elektriciteit ca. $10\frac{1}{2}$ cent per kWh bedragen, onafhankelijk van het wel of niet installeren van kernvermogen. Bij deze uitkomst moet nog worden aangetekend dat, naar mijn mening, het Ministerie van Economische Zaken de kostprijsontwikkeling van fossiele brandstoffen te hoog schat (onder meer doordat men uitgaat van een dollarkoers van *f* 3,10) en de kosten van stroom uit kerncentrales te laag. Ten minste zou men hieruit de conclusie moeten trekken dat over de toekomstige opwekkingskosten van elektriciteit uit kernenergie in vergelijking met alternatieven zoals kolen en gas geen stellige uitspraken zijn te doen in termen van goedkoper of duurder. De Stuurgroep Maatschappelijke Discussie Energiebeleid kwam begin 1984 tot dezelfde conclusie.



Dat kerncentrales nodig zijn om de verzuring van ons milieu als gevolg van de uitstoot van SO_2 en NO_x tegen te gaan, is inmiddels afdoende weerlegd. Door het treffen van voorzieningen in en bij vuurhaarden kan, bij de elektriciteitsopwekking, de uitstoot van deze stoffen tot 10% van de oorspronkelijke hoeveelheden worden teruggebracht. De reducerende werking van kerncentrales is dus marginaal, temeer daar het vraagstuk van de verzuring niet in 2000 of 2010 moet worden opgelost maar nú. Knelpunten liggen daarbij niet primair op het terrein van de elektriciteitsvoorziening, maar bij het verkeer en bij de landbouw (mest).

Het antwoord op de vraag of het toepassen van kernenergie kan voorkomen dat de wereld wordt blootgesteld aan het zgn. CO_2-probleem, lijkt triviaal. Toch is het dat niet, omdat de economisch winbare reserves aan uraan nogal beperkt zijn. Tamelijk algemeen worden deze op 5 miljoen ton geschat. Met lichtwater-reactoren is dit net voldoende om de wereldenergiebehoefte ca. 2 jaar te dekken. Voor het CO_2-probleem krijgt kernsplijtingsenergie dus pas betekenis wanneer duurdere voorraden uraan worden gewonnen. Dit impliceert dat in toenemende mate ertsen met een laag uraan-gehalte (tot beneden 0,01%) moeten worden gewonnen. Hoe armer de ertsen, hoe meer energie de winning van uraan kost (althans in eerste benadering). Dit toenemend energiegebruik kan weer leiden tot een toenemende productie van CO_2. Het is derhalve de moeite waard na te gaan hoeveel uraan er met welke snelheid gewonnen kan worden voordat de winst- en verliesrekening voor CO_2 een negatief resultaat vertoont. Verkenningen hieromtrent worden thans door ons in Utrecht uitgevoerd.
Het ligt voor de hand te veronderstellen dat het CO_2-probleem in ieder geval kan worden bestreden wanneer op grote

3. A.M. Weinberg and E.P. Wigner, The Physical Theory of Neutron Chain Reactors, Univ. of Chicago Press, 1958.
4. G.I. Bell and S. Glasstone, Nuclear Reactor Theory, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1970.
5. A.H. Compton, Atomic Quest, Oxford Univ. Press, London, 1956.
6. A.J. Janssen, Proefschrift Delft, 1971.
7. H. van Dam, On the adjoint space in reactor noise theory, Ann. Nucl. Energy **4** (1977) 185.
8. E.B.J. Kleiss, proefschrift, Delft (1983).
9. H. van Dam en J.E. Hoogenboom, Physics of a Gaseous Core Reactor, Nucl. Techn. **63** (1983) 359.
10. Proceedings of Third JET Workshop on Neutron and Charged Particle Diagnostics, JET-IR (86) 04, 1986.
11. E. Greenspan, Fusion-Fission Hybrid Reactors, Adv. Nucl. Sc. Techn. **16** (1984) 289.

schaal gebruik zou worden gemaakt van kweekreactoren. Deze halen immers 50 à 70 keer meer energie uit natuurlijk uraan dan lichtwater-reactoren. Helaas zijn er ook hier problemen. Zo kunnen kweekreactoren ruimschoots in de eigen splijtstofbehoefte voorzien, maar leveren ze (nog) weinig extra splijtstof die gebruikt kan worden om volgende kweekreactoren op gang te helpen. Het is derhalve niet zeker dat kweekreactoren een adequaat antwoord op het CO_2-probleem kunnen geven.

Tot slot wil ik stil blijven staan bij het vraagstuk van de veiligheid van kerncentrales. Recente studies, onder meer in de USA uitgevoerd, lijken aan te tonen dat ook bij westerse kerncentrales ongevallen kunnen voorkomen waarbij zeer veel slachtoffers vallen en een uitgestrekt gebied langdurig tot onbewoonbaar moet worden verklaard (zie o.a. het recent vrijgegeven concept-rapport NUREG-1150 van de US Nuclear Regulatory Commission). Daarmee wordt de zgn. brontermdiscussie, die vooral sinds het ongeval met de centrale in Harrisburg wordt gevoerd, in weerwil van onder meer het eerder genoemde KEMA-rapport voorlopig – helaas – in het voordeel van de in 1975 gepubliceerde amerikaanse veiligheidsstudie WASH-1400 van de commissie-Rasmussen afgesloten. In die situatie, en gelet op de fouten die mensen keer op keer weten te maken wanneer ze met complexe en potentieel gevaarlijke apparatuur moeten omgaan, lijkt het mij raadzaam kerncentrales ver van de bewoonde wereld te bouwen. Pas wanneer ze inherent veilig zijn, dus smelten van de kern van de reactor niet kan optreden, zou de vestiging van kerncentrales nabij bevolkingscentra kunnen worden overwogen. De ontwikkeling van dergelijke reactoren vergt vermoedelijk zo'n jaar of vijftien. Voor Nederland impliceert dit standpunt dat, zolang goede alternatieven voor het opwekken van elektriciteit aanwezig zijn, voorlopig beter van de bouw van kerncentrales kan worden afgezien.

Meer algemeen, en gesteund door scenario-studies die wij hebben uitgevoerd, is mijn conclusie dat het op grond van kosten- en milieu-overwegingen geenszins voor de hand ligt te kiezen voor kernenergie. Daarbij besef ik dat in de besluitvorming méér overwegingen, met name strategische, een rol spelen.

Wim Turkenburg

Dr. W.C. Turkenburg, universitair hoofddocent bij de vakgroep Atoom- en grenslaagfysica aan de Rijksuniversiteit Utrecht, is docent Natuurkunde, Sterrenkunde & Samenleving aan de RUU. Ook is dr. Turkenburg voorzitter van de sectie Natuurkunde en Maatschappij van de NNV.

Twee reactorongevallen

P. Mostert

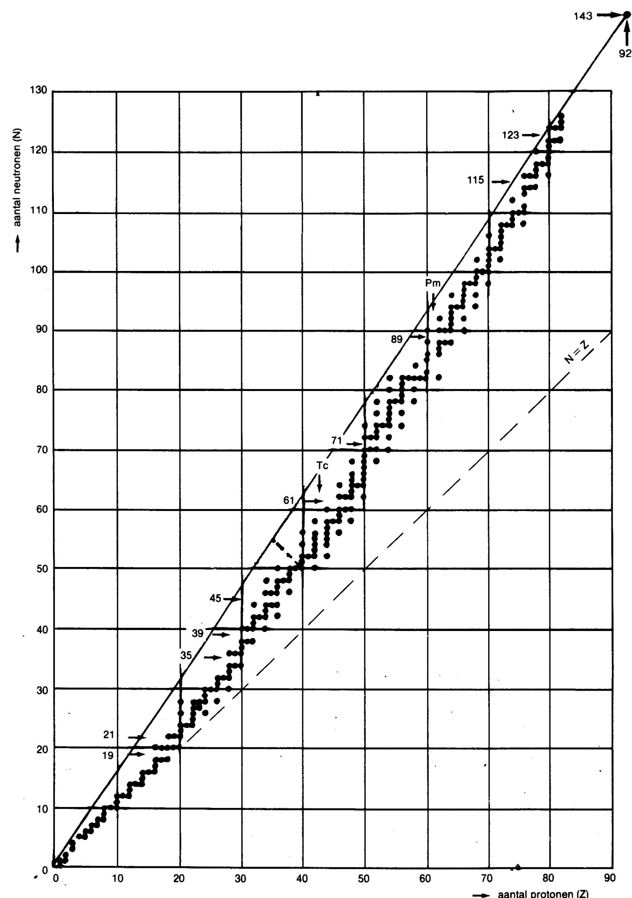
Hoewel er met kernreactoren eerder ongelukken hebben plaatsgehad, zijn het de twee ongelukken met de reactoren van energiecentrales die bij het publiek de meeste aandacht hebben getrokken. Het eerste ongeluk waar hier op geduid wordt, is het ongeluk met eenheid II van de centrale te Three Mile Island (TMI) dicht bij Harrisburg in de Verenigde Staten op 28 maart 1979; het tweede met de reactor te Tsjernobyl bij Kiev in de Sovjet-Unie op 26 april 1986. In het volgende zullen beide ongevallen vergeleken worden. Vooraf enige reactorfysica.

De splijtingsreactie

Toevoeging van een neutron aan U-235 geeft de samengestelde kern U-236, die zeer instabiel is en in 80% van de gevallen door splijting uiteenvalt. Bij deze splijting komt energie vrij, terwijl er tevens nieuwe neutronen worden uitgezonden; tegelijk worden echter ook twee kernen uit het midden van het periodiek systeem gevormd. De meeste daarvan zijn eveneens radioactief, zij het met een veel kortere halveringstijd dan het oorspronkelijke U-235. *Fig. 1* toont de bekende grafiek van de stabiele kernen uit het periodiek systeem der elementen. De plaats van de stabiele kernen daarin wordt bepaald door het aantal neutronen N en het aantal protonen Z. Uit de figuur blijkt dat voor de zwaardere kernen N sterker toeneemt dan Z. Boven $Z = 82$, lood, komen geen stabiele kernen meer voor, maar de bijna stabiele kern van U-235 ($T_{1/2} = 7 \times 10^8$ jaar) met $Z = 92$ en $N = 143$ is ter wille van wat hier volgt, ook in de grafiek opgenomen.

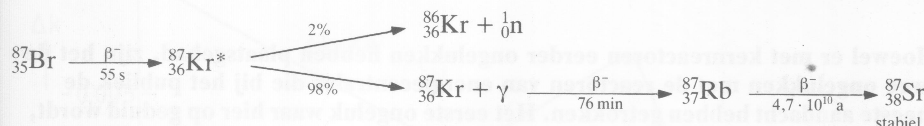
Omdat bij splijting van een U-235-kern twee nieuwe kernen, de splijtingsprodukten, plus twee of drie neutronen vrijkomen, zal de verhouding N/Z van de splijtingsprodukten ongeveer gelijk

Fig. 1. De samenstelling van de stabiele atoomkernen uit protonen (aantal Z; horizontaal) en neutronen (aantal N; verticaal).



zijn aan die in de kern van U-235, zodat de splijtingsprodukten te vinden zijn op de getrokken lijn in fig. 1. Daar deze toestand instabiel is, vervallen deze kernen met β-emissie totdat de lijn met stabiele toestanden bereikt is. In sommige gevallen vindt echter geen β-emissie plaats, maar de emissie van een neutron. Dit laatste treedt b.v. op in de vervalreeks:

Per splijting van een U-235 kern komt een energie van 203 MeV vrij. De verdeling van deze energie over deeltjes en straling blijkt uit *tabel 1*. De kinetische energie van de splijtingsprodukten komt voor het grootste deel vrij in het UO_2 van de splijtstofstaafjes. De andere energieën voor een deel in de splijtstof, maar ook daarbuiten.



Bepalend voor het moment van vrijkomen van het neutron is nu de halveringstijd van de moederkern. Er zijn nog meer vervalreeksen met n-emissie, maar de hier geschetste vervalreeks levert de grootste halveringstijd bij n-emissie. Om deze neutronen te onderscheiden van de 'prompte' neutronen, die direct bij de splijting vrijkomen, noemt men deze neutronen de 'vertraagde' neutronen.

Bij de kettingreactie in een stationair werkende reactor is op elk moment het aantal geproduceerde neutronen gelijk aan het aantal geabsorbeerde en weggelekte neutronen. De verhouding van deze beide aantallen, de vermenigvuldigingsfactor k, is dan gelijk aan één. Van de geproduceerde neutronen behoort 6‰ tot de 'vertraagde'. De relatieve afwijking van $k = 1$ noemt men de reactiviteit. Als deze reactiviteit positief is, neemt het aantal neutronen toe, en daarmee gekoppeld ook het aantal kernsplijtingen en dus het vermogen. Bij een kleine vergroting van de reactiviteit is deze toename langzaam, omdat men moet wachten op de meest vertraagde neutronen. Bij grotere reactiviteit volstaan de minder vertraagde neutronen reeds enz. Bij een reactiviteitsverhoging die groter is dan 6‰, zijn de vertraagde neutronen niet meer nodig voor de vermogensstijging. De reactor kan volstaan met de prompte neutronen. Het vermogen neemt dan zeer snel toe; de reactor is prompt kritiek. Deze prompt-kritieke toestand is opgetreden in Tsjernobyl en heeft geleid tot een explosieve destructie van de reactor.

Voor het ongeluk in TMI was de energie van de splijtingsprodukten het belangrijkst. Deze splijtingsprodukten emitteren hun γ's en β's nog lang nadat de reactor gestopt is. In de tabel zien we dat dit direct na het stoppen van de reactor nog 7% is van het vermogen tijdens bedrijf. Pas na 24 uur is dit afgenomen tot 1% van vol vermogen. Het is vooral deze vervalenergie die een rol speelt na reactorongelukken waarbij verlies van koelmiddel is opgetreden. Was het ongeluk te Tsjernobyl een reactiviteitsongeval, het TMI-ongeluk was een ongeval door verlies van koelmiddel.

Een belangrijk verschil tussen de reactor te Tsjernobyl en de Westerse reactoren, zoals ook de TMI-reactor, is de verhouding moderator/uranium. Bij een grote verhouding van moderator tot uranium neemt de kans dat het neutron geabsorbeerd zal worden in de resonanties van U-238, in het epithermische gebied af. De kans op absorptie in de moderator in plaats van in U-235 neemt echter toe. Dit leidt bij een bepaalde moderator-uraniumverhouding tot een maximum. Links van het maximum is de reactor 'ondergemodereerd', rechts ervan 'overgemodereerd'. Bij de uitzetting van de moderator of bij vorming van holtes daarin (b.v. stoombellen in water) neemt de moderator-uraniumverhouding af. Dit leidt bij een ondergemodereerde reactor tot een afname van de reactiviteit, bij een overgemodereerde reactor tot een toename.

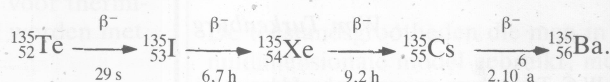
De Westerse reactoren zijn ondergemodereerd, de reactor te Tsjernobyl was



Prof. ir. P. Mostert trad als reactorfysicus bij de N.V. KEMA in dienst na betrokken te zijn geweest bij de bouw van de hoger-onderwijsreactor te Delft. Als hoofd van de afdeling Reactorfysica heeft hij meegewerkt aan de bouw van de reactoren in Dodewaard en Borssele. In zijn huidige functie, adjunct-divisiehoofd van de Divisie Onderzoek en Ontwikkeling, houdt hij zich bezig met het fysisch onderzoek bij de N.V. KEMA. Sinds 1979 is hij bovendien verbonden aan de Rijksuniversiteit Utrecht als bijzonder hoogleraar in de energieconversie.

overgemodereerd. Dat betekent dan ook dat in Westerse reactoren 'toevoeging' van reactiviteit zal leiden tot een toename van vermogen, die weer leidt tot toename van de dampbelfractie en/of uitzetting van het water, waardoor een negatieve terugkoppeling ontstaat. Toename van het vermogen leidt in Tsjernobyl tot een toename van de reactiviteit en dus tot toename van vermogen, dit leidt weer tot een hogere reactiviteit; hier heeft men te maken met meekoppeling. In de praktijk betekent dit dat de reactiviteit die ontstaat door toename van het vermogen, altijd gecompenseerd moet worden door absorptie in regelstaven. In Tsjernobyl wordt dit positieve effect enigszins gecompenseerd door ervoor te zorgen dat er altijd regelstaven in de reactor aanwezig zijn. Afname van de moderatordichtheid leidt dan behalve tot meer absorptie in U-235 ook tot meer absorptie in de regelstaven. Een al te grote reactiviteitstoename wordt daardoor voorkomen. Bovendien geeft een hogere temperatuur van de splijtstof aanleiding tot een verbreding van de resonantie-absorptiepieken in U-238; ook dit geeft een zekere mate van terugkoppeling.

Ten slotte geven de splijtingsprodukten nog aanleiding tot een verschijnsel dat in beide reactortypen een rol speelt. De z.g. xenon-vergiftiging. Deze wordt hierdoor veroorzaakt dat 6,4% van de splijtingen leidt tot de vervalreeks



Belangrijk is nu dat Xe-135 een zeer grote werkzame doorsnede voor absorptie van neutronen heeft, namelijk 2,8 ×

Tabel 1. Verdeling van de energie (in MeV) bij splijting van een U-236 kern. Ca. 7% van de geproduceerde energie komt voor rekening van de β- en γ-straling van de splijtingsprodukten.

kinetische energie splijtingsprodukten	166
kinetische energie neutronen	5
prompte γ-straling	6
β-verval splijtingsprodukten	8
neutrino's	12
γ-energie splijtingsprodukten	6
Totaal	203 (±6)

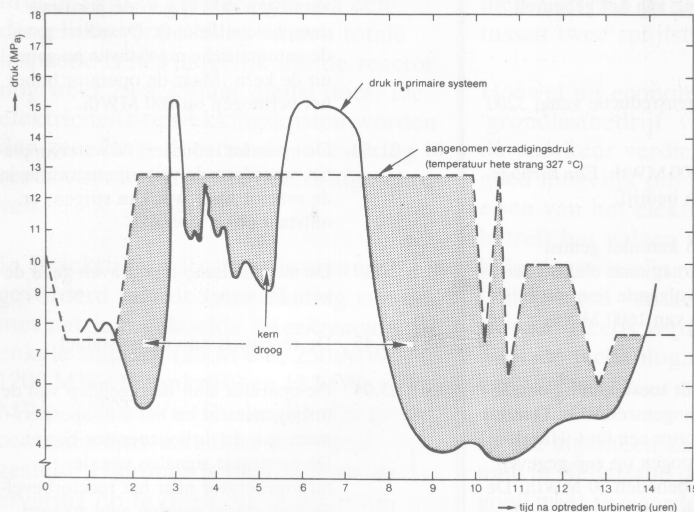


Fig. 2. Het verloop van de druk in de reactor te Three Mile Island als functie van de tijd, kort voor en tijdens het ongeluk op 28 maart 1979.

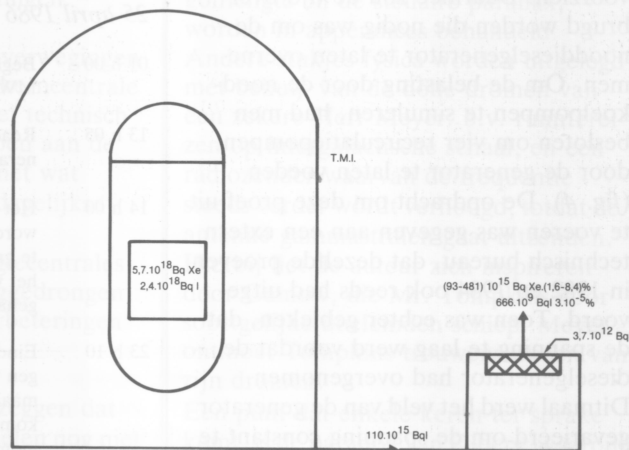


Fig. 3. Lozing van de splijtingsprodukten en hun retentie bij het TMI-ongeluk. Van de 110×10^{15} Bq jodium in het insluitsysteem kwam slechts $4{,}4 \times 10^{12}$ Bq vrij in het hulpgebouw als aerosol (dat gevangen werd in het filter) of gas, d.w.z. 1/25000 deel i.p.v. 1/4 deel zoals voordien werd aangenomen[3].

10^6 barn (d.i. $2{,}8 \times 10^{-22}\mathrm{m}^2$). De andere werkzame doorsneden in deze reeks zijn veel kleiner. Als we Te-135 vanwege de korte halveringstijd buiten beschouwing laten, dan kunnen we opmerken dat in een stationaire situatie de produktie van I-135 en zijn verval met elkaar in evenwicht zullen zijn. De evenwichts-concentratie van Xe-135 wordt bepaald door de aanmaak uit verval van I-135 in evenwicht met het verval van Xe-135 en de (grote) absorptie door neutronen. Bij uitschakelen van de reactor of snelle vermogensafname is deze laatste term de enige die ogenblikkelijk mee verandert, alle andere termen worden bepaald door de halveringstijden. Daar de halveringstijd van Xe-135 langer is dan die van I-135, zien we na een snelle vermogensafname een belangrijke toename van de Xe-135-absorptie optreden, die na enige uren z'n maximum bereikt. Vooral aan het eind van een splijtstofcyclus, als er maar weinig overreactiviteit beschikbaar is, kan deze absorptie vaak niet meer door uittrekken van de regelstaven gecompenseerd worden; men moet wachten tot het Xe-135 vervallen is.

Het TMI-ongeluk

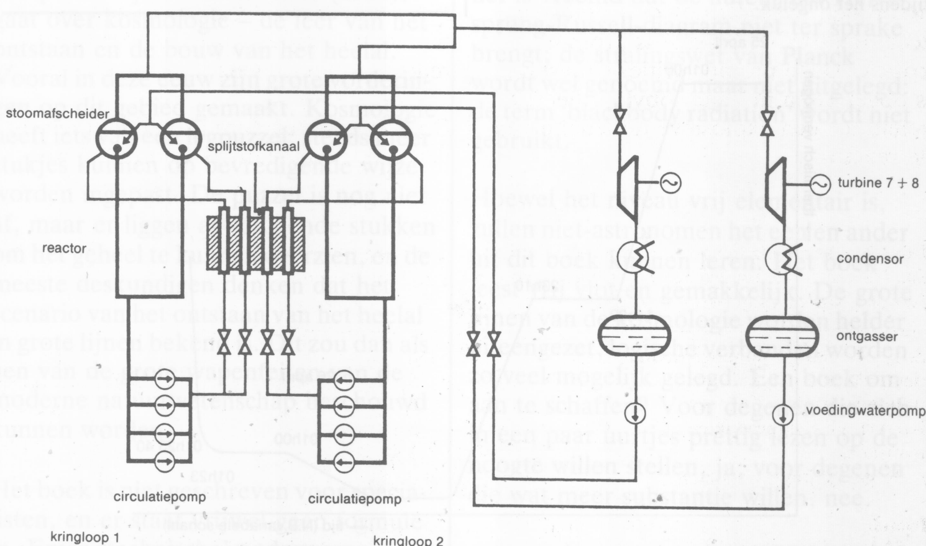
Voor een gedetailleerde beschrijving van dit ongeluk ontbreekt hier de plaats en wordt verwezen naar de literatuur[1,2]. Het verlies van koelmiddel waardoor dit ongeluk in essentie werd veroorzaakt, trad op doordat na een vermogensexcursie een afblaasklep op het primaire systeem niet meer geheel sloot. Door een onjuist signaal werd dit echter pas na 2 uur en 20 minuten onderkend. Ondertussen had de operator wel verkeerde conclusies getrokken uit andere signalen, waardoor de noodkoeling werd afgezet en circulatiepompen werden gestopt. Het gevolg van dit alles was dat de kern vele uren heeft droog gestaan en dientengevolge grotendeels is gesmolten (*fig. 2*). Van de splijtingsprodukten ontsnapten 50% van de edelgassen en het caesium, 30% van het jodium en veel minder van de overige splijtingsprodukten uit de kern. Een deel hiervan was via een vloerputje naar een tank in het hulpgebouw gepompt, waar het uit weglekte en in de omgeving kon komen (*fig. 3*). De inhoud van de kern aan Xe-133 bedroeg $5{,}7 \times 10^{18}$ Bq, waarvan $(93\text{-}481)\times10^{15}$ Bq (1,6 - 8,4%) naar de omgeving ontsnapte. Van de $2{,}4\times10^{18}$ Bq jodium in de kern ontsnapte 666×10^9 Bq (3×10^{-5}%). Caesium en andere splijtingsprodukten ontsnapten geen van alle. Volgens vroegere berekeningen zou 70% van het jodium hebben kunnen ontsnappen. In feite ontsnapte ook 110×10^{15} Bq naar het hulpgebouw, maar daarvan kwam slechts 666×10^9 Bq in de omgeving terecht. Verder werd nog $3{,}7\times10^{12}$ Bq in het filter gevangen. Dus $4{,}4\times10^{12}$ Bq van de 111×10^{15} Bq (of 1/25000 deel in plaats van het 1/4 deel dat vroeger werd aangenomen) was gasvormig of aan aerosolen gehecht.

Een analyse van het ongeval in Harrisburg was nodig om duidelijk te maken hoe zeer de geloosde hoeveelheid te hoog was geschat. Het is de grote verdienste van Levenson en Rahn[3] geweest, dat zij hierop op een zo overtuigende manier de aandacht wisten te vestigen dat de USNRC besloot om meer experimenten aan deze problematiek te wijden.

Tsjernobyl

Ironisch genoeg was het ongeluk te Tsjernobyl het gevolg van een experiment dat diende om de veiligheid van de centrale te vergroten. De bedoeling was om na uitschakelen van de stoomtoevoer naar de turbogenerator de nog aanwezige mechanische energie van de turbogenerator te gebruiken om de noodkoel-

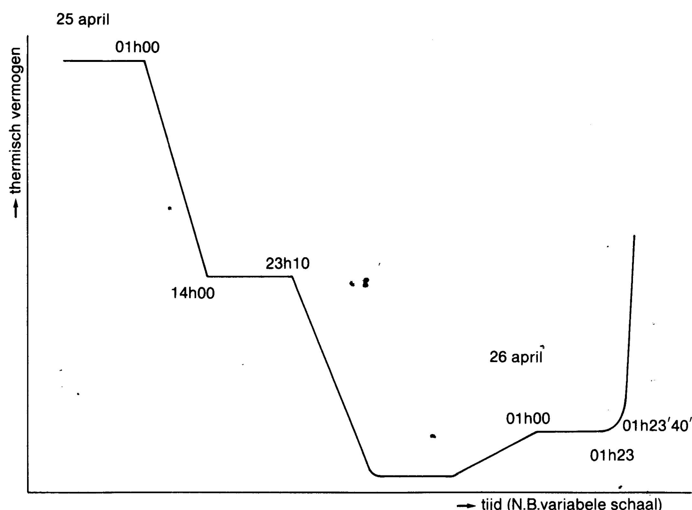
Fig. 4. Schema van de koelmiddelkringloop van de reactoren in Tsjernobyl[4]. (In werkelijkheid zijn er 1690 splijtstofkanalen in het grafiet).



pompen nog enige tijd van energie te voorzien. Daarmee zou de tijd overbrugd worden die nodig was om de nooddieselgenerator te laten overnemen. Om de belasting door de noodkoelpompen te simuleren, had men besloten om vier recirculatiepompen door de generator te laten voeden (*fig. 4*). De opdracht om deze proef uit te voeren was gegeven aan een extern technisch bureau, dat dezelfde proeven in 1982 en 1984 ook reeds had uitgevoerd. Toen was echter gebleken, dat de spanning te laag werd voordat de dieselgenerator had overgenomen. Ditmaal werd het veld van de generator gevarieerd om de spanning constant te houden bij afnemend toerental. Deze experimenten gingen vooraf aan een geplande stopperiode voor algemeen onderhoud, die op zaterdag 26 april in de ochtend zou beginnen. Voor de experimentators was er dus veel aan gelegen om voor die tijd klaar te zijn. Als zij niet op tijd klaar zouden zijn, zou het experiment weer twee jaar moeten wachten. De proef had kunnen gebeuren na een snelle uitschakeling van de reactor, maar om de mogelijkheid te hebben na mislukking een tweede proef uit te voeren, besloot men de test uit te voeren op 700 MWth. De test werd gezien als een louter elektrotechnische aangelegenheid. Een elektrotechnisch ingenieur had de leiding. Het programma was niet besproken met de verantwoordelijke fysicus, noch met de interne veiligheidscommissie of met het inspectoraat. Als alles volgens het geschreven programma zou zijn uitgevoerd, zou er echter geen ongeluk gebeurd zijn.

Het ongeluk kan het best beschreven worden aan de hand van *fig. 5*, waar het thermische vermogen van de reactor staat uitgezet als functie van de tijd.

Fig. 5. Het thermisch vermogen van de reactor te Tsjernobyl als functie van de tijd, kort voor en tijdens het ongeluk.



Chronologische beschrijving van het gebeuren

25 april 1986

01 h 00 Begin vermogensreductie vanaf 3200 MWth.

13 h 05 Reactor op 1600 MWth. Eén turbogenerator buiten bedrijf.

14 h 00 Het vermogen kan niet gemist worden. De vraag naar elektriciteit is te groot. De volgende tien uur blijft het vermogen van 1600 MWth gehandhaafd.

23 h 10 Eindelijk wordt toestemming ontvangen voor vermogensreductie. Daarbij maakt de operator een fout. Hierdoor komt het vermogen op een gegeven moment zelfs beneden 30 MWth. De Xe-vergiftiging kan daardoor sterk toenemen.

26 april 1986

01 h 00 Het lukt eindelijk de reactor op 200 MWth te krijgen. Verdere vermogensverhoging naar de voorgenomen 700 MWth is door de Xe-vergiftiging onmogelijk. Het aantal regelstaven in de kern is nu 6-8, belangrijk minder dan het voorgeschreven minimumaantal van 30 staven.

01 h 03 en
01 h 07 Op beide tijdstippen wordt een circulatiepomp bijgeschakeld. Er waren reeds zes pompen in bedrijf, nu dus acht. Vier pompen werden gevoed door de generator, zodat deze tijdens de uitloop van deze generator vermogen zouden verliezen. De vier andere waren dan beschikbaar om koeling van de reactor te waarborgen. Nu het vermogen van de reactor zo laag is, is door de lage stoombelfractie de hydraulische weerstand in de kern ook laag en het koelmiddeldebiet veel groter dan is toegestaan. Als gevolg van de lage stoombelfractie daalt het waterniveau in de stoom-waterseparator en komt beneden het toelaatbare minimum. Om een noodstop te voorkomen, had de staf de noodstopsignalen geblokkeerd. (Het experiment moest doorgaan.)

01 h 19.30 De operator weet door water te suppleren het niveau in de stoom-waterseparator te herstellen. Het koude gesuppleerde water reduceert de stoomproduktie nog verder en het vermogen zakt (t.g.v. de positieve dampbelcoëfficiënt). Daardoor gaan de automatische regelstaven nu geheel uit de kern. Maar de operator houdt het vermogen op 200 MWth.

01 h 21.50 De operator reduceert de watersuppletie, waardoor de watertemperatuur in de reactor weer wat kan stijgen; er ontstaat enige stoom.

01 h 22.10 De automatische regelstaven gaan de kern in.

01 h 22.45 De reactor is nu vrijwel stabiel.

01 h 23.04 De operator sluit de regelklep van de turbogenerator en het uitloopexperiment van de turbogenerator begint. De eventuele signalen van de turbogenerator naar het reactorbeveiligingssysteem worden geblokkeerd. Men wil voorkomen dat de reactor zou stoppen om eventueel nog een tweede proef te kunnen doen. Al heel snel na het begin van het experiment begint de stoomdruk langzaam te stijgen, 6 kPa/s (dit geeft een negatief reactiviteitseffect).

01 h 23.10 Als gevolg hiervan gaan de regelstaven omhoog. Verder neemt het waterdebiet in de kern af, doordat vier van de circulatiepompen aangesloten zijn op de turbogenerator, die nu in de uitloopfase is. Ook heeft de operator zojuist (01 h 22) de watersuppletie gereduceerd.

01 h 23.21 Het vermogen begint te stijgen en de automatische regelstaven gaan weer omlaag.

01 h 23.31 Ondanks de 'inbewegende' regelstaven is er vermogenstoename.

01 h 23.40 De chef van de wacht geeft opdracht de noodstop in te drukken. Op dat moment waren door het toenemend vermogen de automatische regelstaven al onder in de kern. Bijna alle andere regelstaven waren echter volledig uitgetrokken. Dat betekent dat hun differentiële reactiviteitswaarde bij de aanvang van het inbewegen zeer klein was. De positieve terugkoppeling van de reactiviteit via de dampbelcoëfficiënt heeft al zeer snel voor een erg grote overactiviteit gezorgd, zodat het reactorvermogen zeer snel begint te stijgen.

01 h 23.43 Het vermogen loopt op tot een zeer hoge waarde.

Wat er in de volgende seconden gebeurde, komt uit een Russische computersimulatie van het ongeluk:

01 h 23.44 Bij de eerste vermogensexcursie loopt de splijtstoftemperatuur hoog op, de positieve reactiviteit wordt gecompenseerd door het Doppler-effect in vangstresonanties van U-238 en de inbewegende regel- en stopstaven.

01 h 23.45 Een zeer snelle toename van het stoomvolume en daardoor een zeer snelle toename van de reactiviteit. Dit geeft aanleiding tot een tweede vermogensexcursie, die tot een vermogen leidt dat zeker 100× de nominale waarde bedraagt. De splijtstof springt uit elkaar en wordt zeer fijn gedispergeerd in het nog aanwezige water, dat daardoor

explosief in stoom verandert. Door deze explosie worden het bovendeksel weggeblazen, alle stoomleidingen en waterleidingen vernield en veel grafietblokken uit de kern geblazen.

In een aantal Westerse landen, en ook in Nederland bij de N.V. KEMA, is getracht dit ongeval na te rekenen. Deze berekeningen hebben met elkaar gemeen dat de berekende reactiviteitstoename door stoombelvorming te laag uitkomt om deze vermogensexcursie te kunnen hebben veroorzaakt. Er moet op andere wijze nog meer reactiviteit vrijgekomen zijn. De hypothese dat deze toevoeging van reactiviteit samenhing met de constructie van de regelstaven klinkt waarschijnlijk.

Enige seconden na de zojuist beschreven explosie werd een tweede explosie gehoord. Men neemt aan dat dit een chemische explosie is geweest. De reactor lag al geheel open. Er zijn nog speculaties gaande over de oorsprong van deze chemische explosie. Veel tijd voor Zr-H_2O-reactie, waarbij waterstof gevormd wordt, was er niet geweest. Een mogelijkheid vormt de reactie van het fijn verdeelde UO_2 met water, zodat U_3O_8 en H_2 gevormd zouden zijn. De beide explosies zorgden ervoor dat brandende stukken materiaal de lucht in werden geslingerd en o.a. op de turbinehal en andere nabijgelegen gebouwen terecht kwamen. Hierdoor ontstond op vele plaatsen brand, die om 5 uur tegen de ochtend geblust was.

Op het moment van het ongeval bevatte de kern aan splijtingsprodukten 40×10^{18} Bq. De isotopensamenstelling, zoals berekend op grond van gegevens van de Sovjet-autoriteiten, is gegeven in *tabel 2*. Uitgaande van stralingsmetingen en

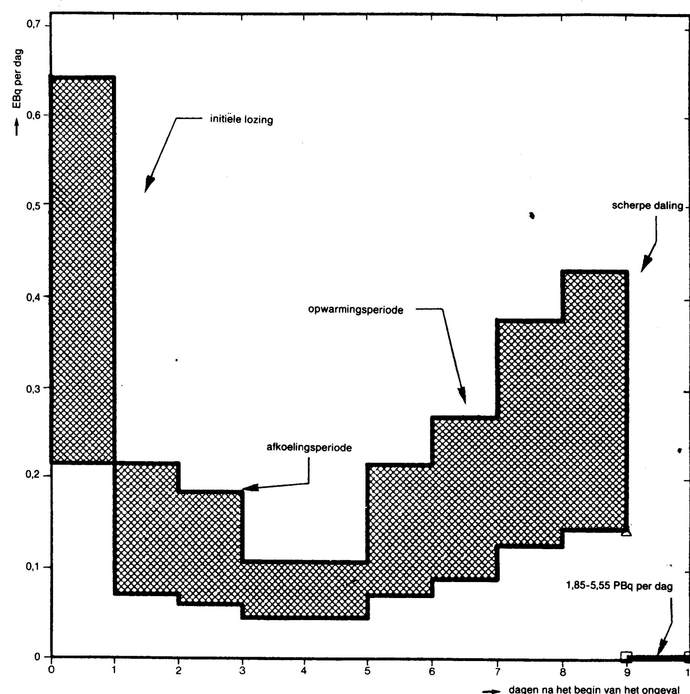


Fig. 6. Lozingssnelheid van radioactiviteit gedurende het ongeval bij Tsjernobyl. Het gearceerde gebied geeft de onzekerheidsmarge aan[4].

analyse van monsters, genomen in een gebied van 30 km rond de centrale, komt men tot de schatting dat 1-2×10^{18} Bq gedurende het ongeval werd geloosd, afgezien van de edelgassen. De geïntegreerde lozingen van de individuele isotopen zijn in tabel 2 ook gegeven als percentage van de kerninhoud. Van de edelgassen moeten we aannemen dat ze volledig uit de splijtstof zijn verdwenen. Ongeveer 10-20% van de vluchtige nucliden zoals I, Cs en Te zijn geloosd. De minder vluchtige elementen Ba, Sr, de lanthaniden (b.v. Ce) en de actiniden (zoals Pu) zijn voor ongeveer 3-6% geloosd.

De lozing vond plaats gedurende een periode van tien dagen. Ongeveer 25% van de lozing vond de eerste dag plaats. Gedurende de negen volgende dagen werden lucht- en grondmonsters genomen waaruit de Russische experts *fig. 6* construeerden. Het gearceerde gebied in deze figuur geeft de onzekerheidsmarge aan. De gemiddelde waarde ligt dus halverwege dat gebied. Na de eerste dag nam de lozing af tot een minimale waarde van éénzesde. Daarna volgde een periode van vier dagen waarin de lozing weer geleidelijk steeg tot een waarde die bijna 70% is van de initiële lozing. Na negen dagen volgde opnieuw een (plotselinge) afname tot minder dan 1% van de initiële lozingssnelheid, gevolgd door een verdere geleidelijke afname.

De stijging van de lozing na vier dagen is tot nu toe niet afdoende verklaard. Er zijn verschillende hypothesen, die er alle op neerkomen dat de temperatuur weer kon stijgen, bij voorbeeld doordat de warmteafvoer slechter werd. Er was immers zeer veel materiaal op de reactor geworpen om de lozing te beperken. Tot dit materiaal behoorde ook veel lood, dat uiteraard eerst moest smelten voordat de temperatuur weer kon stijgen. Een andere mogelijkheid is dat het gesmolten materiaal werd blootgesteld aan een luchtstroom met grote snelheid, zodat daardoor materiaal meegevoerd kon worden. Merkwaardig is ook dat niet alleen de lozing van de vluchtige materialen zoals I_2, Cs en Te toenam, maar ook die van de niet-vluchtige materialen zoals strontium, barium, molybdeen en de lanthaniden. Een theorie is dat UO_2 en zirconium, voor

Tabel 2. De inhoud van de kern van de reactor te Tsjernobyl en de fractie daarvan aan geloosde radionucliden.

Element	Halveringstijd (dagen)	Kerninhoud (Bq)	Geloosde fractie* (%)
Kr-85	3930	$3,3 \times 10^{16}$	100
Xe-133	5,27	$1,7 \times 10^{18}$	100
I-131	8,05	$1,3 \times 10^{18}$	20
Te-132	3,25	$3,2 \times 10^{17}$	15
Cs-134	750	$1,9 \times 10^{17}$	10
Cs-137	$1,1 \times 10^4$	$2,9 \times 10^{17}$	13
Mo-99	2,8	$4,8 \times 10^{18}$	2,3
Zr-95	65,5	$4,4 \times 10^{18}$	3,2
Ru-103	39,5	$4,1 \times 10^{18}$	2,9
Ru-106	368	$2,0 \times 10^{18}$	2,9
Ba-140	12,8	$2,9 \times 10^{18}$	5,6
Ce-141	32,5	$4,4 \times 10^{18}$	2,3
Ce-144	284	$3,2 \times 10^{18}$	2,8
Sr-89	53	$2,0 \times 10^{18}$	4,0
Sr-90	$1,02 \times 10^4$	$2,0 \times 10^{17}$	4,0
Np-239	2,35	$1,4 \times 10^{17}$	3
Pu-238	$3,15 \times 10^4$	$1,0 \times 10^{15}$	3
Pu-239	$8,9 \times 10^6$	$8,5 \times 10^{14}$	3
Pu-240	$2,4 \times 10^6$	$1,2 \times 10^{15}$	3
Pu-241	4800	$1,7 \times 10^{17}$	3
Cm-242	164	$2,6 \times 10^{16}$	3

* Gecorrigeerd voor verval en berekend op de door de Russische experts voorgeschreven wijze.

zover nog aanwezig, met elkaar hebben gereageerd. Het zirconium zal zeker veel zuurstof hebben bevat en boven 1500 K zijn reacties waarbij het UO_2 nog verder wordt geoxideerd, goed denkbaar. De plotselinge afname van de lozing aan het eind is nog wonderlijker. Mogelijk is gesmolten kernmateriaal naar beneden gezakt, naar een plaats waar betere warmte-afgifte mogelijk was.

De vraag blijft of een verdere bestudering van de lozingen, die zeker zal plaatsvinden, veel nieuwe informatie zal geven over de ongevalsscenario's die denkbaar zijn bij lichtwaterreactoren. In deze scenario's wordt het vrijkomen van de splijtingsprodukten altijd voorafgegaan door een fase-overgang in de splijtstof en verdamping van de splijtingsprodukten. De fragmentatie van de splijtstof die in Tsjernobyl is opgetreden, is verantwoordelijk voor 25% van de lozing. Dit proces heeft deeltjes opgeleverd met afmetingen kleiner dan 10 μm. Deze deeltjes hadden aanvankelijk dezelfde samenstelling als de splijtstofelementen, maar door hun zeer grote oppervlakte in verhouding tot hun massa moet worden aangenomen dat de vluchtige bestanddelen gemakkelijk konden ontsnappen. Ook de oxidatie van deze deeltjes heeft bijgedragen aan de lozing, terwijl ze later weer konden dienen als condensatiekernen voor sommige vluchtige bestanddelen.

Nabeschouwing

De Russen leggen veel nadruk op de fouten van de operators van de reactor te Tsjernobyl. Zij noemen een zestal overtredingen van de voorschriften, die inderdaad hebben plaatsgevonden. Verder wijzen zij erop dat het experiment plaatsvond onder tijdsdruk. Het was vrijdagnacht om 1 uur. Een tijd waarop vele mensen toch al moe zijn. Wat ook een rol gespeeld heeft, is dat de verantwoordelijkheden niet duidelijk gescheiden waren. De operators waren bij het experiment betrokken en ook hen was er veel aan gelegen om de experimenten te laten slagen. Dit is een onjuiste situatie. Een operator is verantwoordelijk voor het functioneren van de centrale en voor de veiligheid ervan. De experimentator is verantwoordelijk voor het experiment. De bedrijfsleider is verantwoordelijk voor beide. De operator werkt volgens goedgekeurde geschreven procedures, waarvan alleen afgeweken wordt als de bedrijfsleider toestemming geeft. Hoe het ook zij, de fouten van de operator gecombineerd met het slechte ontwerp hebben tot dit vreselijke ongeluk geleid.

Nu, 12 maanden na het ongeluk, zijn alle drie nog aanwezige reactoren in Tsjernobyl weer in gebruik. De Russen hebben aangekondigd toch door te gaan met de bouw van nieuwe reactoren van dit type. Wel zullen er vier modificaties aangebracht worden:

- Bij uittrekken van de regelstaven moet een lengte van 1,2 m in de kern blijven.
- Van de 211 regelstaven moeten er altijd ten minste 80 staven voor de 'operative reactivity margin' in de kern zijn. Dit houdt de dampbelcoëfficiënt laag.
- De verrijking van 2% wordt verhoogd tot 2,4%. Ook hiermee wordt de dampbelcoëfficiënt gunstig beïnvloed; het maximum komt bij een hogere waarde van de verhouding moderator/uranium te liggen.
- Er wordt een systeem aangebracht voor snelle reactiviteitsinsertie. De reactor moet in 1-2 seconde onderkritisch kunnen zijn. Er is nog niet bepaald of de daarvoor te gebruiken absorber vloeibaar, vast of gasvormig moet zijn.

Bij de reactor te Three Mile Island ligt de zaak nadrukkelijk anders. De reactor was pas kort in gebruik (ongeveer drie maanden). Er was geen sprake van een experiment. Het ongeluk werd geïnitieerd door de verkeerde stand van een afsluiter tijdens werk aan het secundaire systeem – een fout van de operator –, maar als het systeem daarna goed gefunctioneerd had, was er niets gebeurd. De operator heeft op grond van verkeerde en verkeerd geïnterpreteerde informatie – dus een kwestie van te weinig instrumentatie en onvoldoende inzicht in de installatie – alle handelingen verricht zoals het hem geleerd was ('according to the book').

Het heeft zeven jaar geduurd voordat de andere reactor die op de vestigingsplaats van TMI stond (TMI I), weer opgestart mocht worden. Het manco in de instrumentatie van TMI is aangegrepen om de instrumentatie van de Westerse reactoren nog eens grondig te herzien. Het gebrek aan inzicht van de operators heeft weer eens het belang van een goede training benadrukt. En ten slotte heeft de lozing tijdens het ongeluk geleerd, dat voor dit soort ongelukken de schattingen van de consequenties in gunstige zin kunnen worden bijgesteld. In hoeverre deze regel voor de lichtwater-reactoren in algemene zin geldt, vormt op dit ogenblik een onderwerp van veel onderzoek, de zgn. brontermstudies.

Referenties

1. M. Rogovin, Three Mile Island: A Report to the Commission and to the Public. 1, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington D.C., 1980.
2. P. Mostert, Elektrotechniek **57**(1979) no. 7, 477.
3. Reactor Safety Study – An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants, WASH-1400 (NUREG 75/014), U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1975.
4. Summary Report on the Post-Accident Review Meeting on the Chernobyl Accident. Safety Series No. 75-INSAG-1. IAEA, 1986.

Natuurkunde, splijting en versmelting

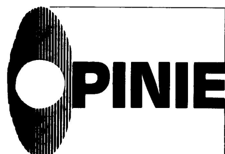
Jarenlang heb ik in Leiden een college 'Fysische aspecten van kernenergie' gegeven. Omstreeks 1970, toen alle media vertelden dat de studenten zo mondig waren geworden, viel me op dat de meesten me in het begin zo glazig zaten aan te kijken. Langzamerhand drong tot me door dat ze een kernreactor alleen kenden als iets waar men voor of tegen moest zijn en niet als iets waarop hetgeen ze in hun andere, grotendeels theoretische, colleges leerden, kon worden toegepast.

Hoe mooi ware het toen geweest als ik ze had kunnen verwijzen naar het Tijdschrift voor Natuurkunde voor een overzicht van wat Nederlandse natuurkundigen op het gebied van de kernenergie deden. Dat is er nu wel, al is het, voor wat de kernsplijting betreft, rijkelijk laat. Niet alleen leveren thans in ettelijke landen thermische splijtingsreactoren het leeuwedeel van de elektriciteit, maar is eigenlijk ook de volgende generatie, de snelle kweekreactor, al vrijwel volledig ontwikkeld. De dagen van grote reactorfysische experimenten liggen dan ook alweer ver achter ons. Het gaat nu meer om aanvullingen en verfijningen, en daarvan geeft dit nummer interessante voorbeelden.

De kernfusie, daarentegen, is nog steeds grotendeels natuurkunde. Wel zijn de plasmafysici in bijna dertig jaar ver opgerukt langs hun logaritmische parameterschalen, maar het beheerste thermonucleaire plasma moet nog altijd worden vertoond.

Dat faseverschil brengt ook een groot verschil met zich mee in de manier waarop onderzoek en ontwikkeling zijn georganiseerd, nationaal zowel als internationaal. In de jaren vijftig bedacht vrijwel elk land zijn eigen splijtingsreactor, maar als nu ergens, afgezien van Canada en zijn weinige klanten, een kerncentrale wordt gebouwd, wordt

die uitgerust met een lichtwaterreactor (ook de Russen zal na Tsjernobyl de lust om nog grafietreactoren te bouwen, wel zijn vergaan). Die standaardisatie is niet te danken aan de inspanningen van Euratom, het IAEA en andere multinationale lichamen, maar aan marktmechanismen. De winnaars waren daarbij de Amerikaanse ondernemingen, die sterk hadden kunnen profiteren van overheidsprogramma's, en hun Europese en Japanse licentienemers, alle traditionele leveranciers van elektrische centrales.



Met de snelle kweekreactor zal het niet anders lopen: ook daar heeft de Europese Commissie geen poot aan de grond kunnen krijgen, en tekent zich pas een samenwerking en standaardisatie af nu Britten, Duitsers en Fransen moeten 'overwinteren' tot de marktvooruitzichten beter worden.

Bij de kernfusie hebben marktvooruitzichten nooit een rol gespeeld, en dus heerst hier Europese eendracht, met een JET-project, een NET-team en een redelijke mate van coördinatie van wat er in de nationale laboratoria gebeurt. De andere grootmachten op dit gebied, de VS, de USSR en Japan, accepteren de Europese Gemeenschap als op zijn minst gelijke. Het gaat nog wat verder, want de vier partijen werken in Wenen samen aan INTOR, en wie weet zal de dooi in de Oost-West-relaties nog eens de gezamenlijke bouw van de 'next step' mogelijk maken.
Indachtig wat er bij de kernsplijtingsenergie is gebeurd, rijst natuurlijk de vraag of het allemaal wel zo mooi zal blijven als de fusiereactor werkelijk in zicht komt. Voorlopig is er nog geen regering die hem serieus neemt als toekomstige energiebron. De meeste beschouwen het werk aan de opsluiting en verhitting van plasma min of meer als fundamenteel fysisch onderzoek en laten het in handen van organisaties als FOM, of, als het onder een organisatie voor energieonderzoek valt, zoals het Franse Commissariat à l'Energie Atomique, dan toch in een speciale tak daarvan. Maar hoe lang zal dat zo kunnen blijven? Binnen FOM, waar de juiste maatstaf is hoeveel interessante fysica een gulden oplevert, zien we de fusie het langzamerhand afleggen. In de grotere landen is het nog niet zo ver, doordat men een groot Europees fusie-experiment huisvest of de hoop koestert dat in de toekomst te mogen doen. De conclusie lijkt daarom gerechtvaardigd dat de Europese eendracht nog wel zal reiken totdat het thermonucleaire plasma er is.

Maar zal er dan de industrie zijn die daarmee iets gaat doen? We zien die nog het duidelijkst in Japan, waar grote stukken van fusie-experimenten aan de industrie worden overgelaten. In Europa zijn uiteraard componenten door de industrie geleverd, maar verder is die niet bij de ontwikkeling betrokken. Wel hebben inmiddels de kernenergielaboratoria zich op de hun goed liggende problemen van materiaalkeuze en kweekmantel (voor het kweken van tritium) geworpen, soms ook op de magneettechnologie. Ook dat gebeurt met financiële steun van de Europese Commissie, die zich daarbij wat sterkere coördinerende bevoegdheden heeft weten te verwerven dan bij de plasmafysica. In nationaal kader, daarentegen, vinden de twee soorten fusie-onderzoek goeddeels los van elkaar plaats, vaak gefinancierd door verschillende ministeries, in Nederland O&W en EZ.

De bestuurlijke vaardigheid om tot een betere organisatie te komen, heeft zich in Nederland tot nu toe niet gemanifesteerd en elders evenmin. Daarom hoort op het lijstje van dingen waarvan in ons werelddeel niets terecht zal komen zonder de Europese Gemeenschap, zeker ook de fusiereactor thuis.

J.A. Goedkoop

Enige begrippen, grootheden en eenheden

Radioactiviteit

Onder *radioactiviteit* verstaat men het verschijnsel dat een kern spontaan één of meer deeltjes en/of elektromagnetische straling uitzendt. De eenheid van radioactiviteit is de *becquerel* (= seconde^{-1}). De radioactiviteit (A) van een hoeveelheid materie is één becquerel (Bq) als er van die stof één kern per seconde vervalt. De vroegere eenheid was de curie (1 Ci = 37 × 10^9 Bq).

Dosis en dosisequivalent

De *dosis* (D) is de per massa-eenheid geabsorbeerde hoeveelheid (stralings)energie, uitgedrukt in *gray* (Gy) = joule/kilogram. Vroegere eenheid: rad (radiation absorbed dose) = 0,01 gray.

De schade in menselijk weefsel hangt niet alleen af van de dosis maar ook van de soort straling. Daarom is de grootheid *dosisequivalent* (H) ingevoerd, gedefinieerd als dosis (D) maal kwaliteitsfactor (Q) en uitgedrukt in de eenheid *sievert* (Sv) = joule/kilogram.

De kwaliteitsfactor Q bedraagt:
- 1 voor röntgen- en gammastraling en voor elektronen,
- 2,3 voor thermische (< 25 meV-) neutronen,
- 10 voor andere neutronen, protonen en soortgelijke enkelvoudig geladen deeltjes,
- 20 voor α-deeltjes en soortgelijke meervoudig geladen deeltjes.

Vroegere eenheid: rem (radiation equivalent man) = 0,01 sievert.

In de praktijk van de stralingshygiëne wordt 'dosisequivalent' meestal kortweg 'dosis' genoemd. Aan de hand van de naam van de gebruikte eenheid is dan toch vast te stellen welke grootheid wordt bedoeld.

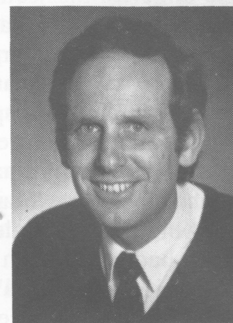
Bronterm

'Bronterm' is de letterlijke vertaling van het Engelse 'source term', een fysisch-mathematisch begrip. Onder bronterm verstaat men het geheel van factoren die de samenstelling, hoeveelheid en wijze van vrijkomen beschrijven van radionucliden in de biosfeer. De bronterm bevat dus voor elke daarin voorkomende radioactieve stof gegevens over:
- De fysisch-chemische toestand.
- De geloosde hoeveelheid, als functie van de tijd.
- De plaats (hoogte) van de lozing, de impuls en warmte-inhoud.

De laatste categorie gegevens is in het bijzonder van belang voor consequentieberekeningen dicht bij de plaats van de lozing.
De geloosde hoeveelheid drukt men uit in *massa* (kilogram) òf in *radioactiviteit* (becquerel). Deze grootheden zijn met behulp van het atoomgewicht en de halveringstijd naar elkaar om te rekenen. Vaak vermeldt men niet elke in de lozing voorkomende nuclide, maar groepen van nucliden met gelijksoortig fysisch-chemisch gedrag.
Ook drukt men de bronterm wel uit als *fractie van de kerninventaris*, al dan niet gedifferentieerd naar nuclide(ngroep). Hierbij zij vermeld dat de radioactieve kerninventaris naar aard en omvang afhangt van de tijd dat de desbetreffende splijtstof in bedrijf is, alsook van het type en het vermogen van de reactor.

Inherente veiligheid bij kernreactoren

W.J. Oosterkamp



Dr. ir. W.J. Oosterkamp (1943) studeerde Technische Natuurkunde aan de TU Eindhoven en promoveerde daar bij prof. dr. M. Bogaardt op de meting en berekening van reactiviteitscoëfficiënten in kernreactoren. Van 1965 tot 1973 was hij werkzaam bij het Kernforschungszentrum te Karlsruhe, onderbroken door een verblijf in de U.S.A. Van 1973 tot 1977 was hij hoogleraar in de reactorfysica te Sao Paulo (Brazilië). Sedertdien is dr. Oosterkamp als reactorfysicus werkzaam bij de KEMA te Arnhem.

De veiligheid van een kernenergiecentrale is afhankelijk van een combinatie van veiligheidseigenschappen en veiligheidsmaatregelen. Daarbij kan onderscheid worden gemaakt tussen systeemtechnische veiligheid en inherente veiligheid. Systeemtechnische veiligheid wordt gevormd door pompen, afsluiters en regelsystemen die geïnstalleerd zijn ter voorkoming van ongevallen of beperking van de gevolgen van ongevallen. Het functioneren van deze voorzieningen kan worden beïnvloed door het falen van mensen, materialen of componenten.
Inherente veiligheid wordt gevormd door de op fysische wetten gebaseerde eigenschappen, waardoor de veiligheid in elk geval positief wordt beïnvloed. Deze veiligheid ligt vast door het ontwerp van de installatie en wordt niet beïnvloed door technisch of menselijk falen.
Het is een misverstand te menen dat de ene kerncentrale inherent veilig en een ander inherent onveilig zou zijn. Bij een discussie over (ernstige) reactorongevallen is het van meer belang om vast te stellen welke inherente veiligheidseigenschappen een bepaalde kernenergiecentrale bezit en of deze op zich voldoende zijn om ongevallen met ernstige gevolgen voor de omgeving te kunnen uitsluiten.

Inleiding

Voor de leek bestaat de onveiligheid van kernreactoren uit de mogelijkheid dat een reactor kan ontploffen als een atoombom en uit de verspreiding van radioactieve splijtingsprodukten. Wat het eerste betreft, zijn de huidige reactoren inherent veilig ontworpen. Door het gebruik van laag-verrijkt uranium kan er geen grote overreactiviteit verkregen worden, terwijl er ook geen mechanismen zijn die de reactiviteit snel kunnen doen toenemen.

De inherente veiligheid ten aanzien van de verspreiding van splijtingsprodukten wordt gewaarborgd door het insluitsysteem, mits dit goed ontworpen is. Verspreiding van splijtingsprodukten op een grote schaal in de kerncentrale kan alleen optreden indien de gemiddelde splijtstoftemperatuur stijgt tot boven 1500-2300 K. Een dergelijke temperatuur kan ontstaan door reactiviteitsexcursies of door het wegvallen van de koeling.

Het ongeval met de reactor te Tsjernobyl is een voorbeeld van het eerste, terwijl het ongeval met de reactor te Harrisburg een voorbeeld van het tweede is. In het volgende zullen de voornaamste onderwerpen aan de orde worden gesteld die belangrijk zijn bij het beoordelen van de mate waarin een reactorontwerp voldoet aan de wenselijkheid van een optimale veiligheid.

Reactiviteitsexcursies

De reactiviteit van een systeem wordt gedefinieerd als:

$$\varrho = (k - 1)/k, \tag{1}$$

waarbij k de verhouding tussen de produktie en de absorptie is. Onder normale omstandigheden wordt de overreactiviteit gecompenseerd met regelstaven of met boriumhoudend water en is de reactor net kritiek. Alleen bij het opstarten en het omlaagbrengen van het vermogen zal de reactiviteit in geringe mate van nul verschillen. De af- en toename van het vermogen zal dan met een halveringstijd of verdubbelingstijd gebeuren die veel groter is dan de ca. 20 s die een mens nodig heeft om het gebeuren te kunnen volgen en adequaat te kunnen reageren. Indien echter regelstaven ongecontroleerd uitlopen of uitgetrokken worden of wanneer boriumhoudend water vervangen wordt door zuiver water, kunnen er vermogensexcursies ontstaan waarbij een belangrijke hoeveelheid warmte kan vrijkomen.

Onder bepaalde vereenvoudigingen kan het tijdsafhankelijke gedrag van een reactor beschreven worden met een stelsel gekoppelde differentiaalvergelijkingen:

$$\frac{dn}{dt} = k(\varrho - \beta)\frac{n}{L} + \sum_{i=1}^{I} \lambda_i C_i , \tag{2}$$

$$\frac{dC_i}{dt} = k\beta_i \frac{n}{L} - \lambda_i C_i , \tag{3}$$

daar een gedeelte van de neutronen door een aantal kernen met een vertraging van 0,2-30 s wordt uitgezonden. In deze vergelijkingen is n de neutronendichtheid, β de fractie aan neutronen die vertraagd worden uitgezonden, β_i de fractie aan neutronen waarvan de voorloperkern een vervalconstante λ_i heeft, C_i de concentratie aan kernen met een vervalconstante λ_i voor vertraagde neutronemissie, I het aantal isotopen dat vertraagd een neutron uitzendt, en L de levensduur van een neutronengeneratie. Indien de reactiviteitstoename minder dan β is (vgl. formule 2), zal de toename van de neutronendichtheid door de vertraagde neutronen bepaald worden en een excursie slechts langzaam verlopen. Is de toename groter dan β, dan zal dit met de levensduur van de neutronen gebeuren, die veel korter is. Men spreekt dan van een superprompte excursie. De gevolgen van een reactiviteitsexcursie hangen uitsluitend af van de toegevoegde energie en slechts indirect van het maximale vermogen. Het maximale vermogen wordt beperkt door terugkoppelingen. Het hangt van de tijdconstanten van deze terugkoppelingen af hoe groot de extra geproduceerde hoeveelheid warmte is.

Reactorberekeningen

Voor de bepaling van de reactiviteit moet er een neutronenfysische berekening worden uitgevoerd die gekoppeld is aan een thermohydraulische berekening om de temperaturen en moderatordichtheden te verkrijgen. Zoals in het artikel van Van Dam reeds is uiteengezet, gaat de neutronenfysische berekening uit van de vergelijking van Boltzmann voor het neutronentransport. Deze moet echter sterk vereenvoudigd worden wil zij hanteerbaar zijn. De vrije-weglengte voor neutronen varieert van 1 tot 100 mm over een energiegebied van 1 meV tot 1 MeV. Uranium en plutonium bezitten een groot aantal resonanties met een breedte van enkele meV.

Een kernreactor bezit een karakteristieke lengte van 3 m. De verdubbelingstijd kan bij superprompte excursies enkele ms zijn. Het aantal maaspunten in neutronenenergie, ruimte en tijd dat voor een ab initio-beschrijving nodig is, overstijgt de geheugencapaciteit van de huidige generatie rekenmachines met vele ordes van grootte.

Voor de Nederlandse kerncentrales worden dergelijke berekeningen uitgevoerd in 28 groepen die logaritmisch over het energiegebied gelegd zijn. De resonanties worden analytisch behandeld voor een equivalent homogeen medium met een correctie voor heterogeniteitseffecten. De berekeningen in 28 groepen wordt voor een splijtstofelement in twee dimensies uitgevoerd met behulp van stootwaarschijnlijkheden, waarbij isotrope verstrooiing van neutronen wordt aangenomen. Met behulp van de zo verkregen reactiesnelheden worden in zes groepen effectieve werkzame doorsneden bepaald, waarna met behulp van de discrete-ordinatenmethode een ruimtelijke vermogensverdeling in het splijtstofelement bepaald wordt. De resultaten van deze berekening worden gebruikt voor een ééngroeps driedimensionale berekening van de hele reactor. Het spreekt vanzelf dat met zoveel vereenvoudigingen de resultaten van de berekeningen getoetst moeten worden aan een breed spectrum van experimentele gegevens.

De thermohydraulica wordt in principe beschreven door de vergelijkingen van Navier-Stokes. De stroming van de koeling is in alle reactoren turbulent, waardoor de kleinste schaal een fractie van een millimeter is en oplossingen met de huidige rekenmachines niet mogelijk zijn. Sinds kort wordt er geprobeerd de turbulentie te beschrijven door convectie en diffusie met behulp van niet-lineaire coëfficiënten. De resultaten hiervan zijn veelbelovend. Voor de meeste toepassingen wordt gebruik gemaakt van experimentele correlaties, waardoor met een beperkte hoeveelheid rekenwerk toch een goede beschrijving van het thermohydraulische gedrag verkregen wordt.

Reactiviteitseffecten

Wil men van inherente veiligheid kunnen spreken, dan moeten de terugkoppeleffecten dusdanig zijn dat een verhoging van de reactiviteit wordt opgevangen voordat er schade aan de reactor ontstaat. Bij de bestaande lichtwaterreactoren zijn deze terugkoppelmechanismen het Doppler-effect van de splijtstof en de invloed van de dampbellen. Tevens mag de maximale reactiviteit niet te groot zijn. De toename van reactiviteit wordt bij alle typen beperkt door de neutronenabsorbers (die voor de regeling gebruikt worden) te verdelen over een groot aantal staven en ervoor te zorgen dat deze slechts langzaam getrokken kunnen worden. Bij drukwaterreactoren kan het borium slechts langzaam worden verdund. Kleine reactiviteitsverhogingen worden opgevangen door de inherente Doppler- en dampbelreactiviteit. Bij de, zeer onwaarschijnlijke, grotere excursies moet gebruik gemaakt worden van een snel uitschakelsysteem. Een detectiesysteem meet de neutronenflux en de eerste afgeleide naar de tijd. Overschrijdt de flux of de afgeleide een bepaalde waarde, dan worden een groot aantal staven met neutronen-absorberend materiaal de kern ingeschoten, waardoor de reactor wordt uitgeschakeld.

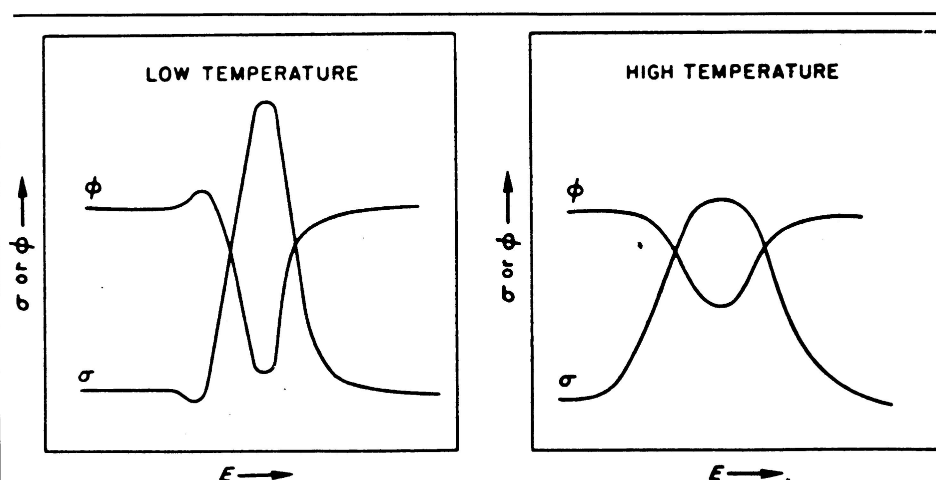


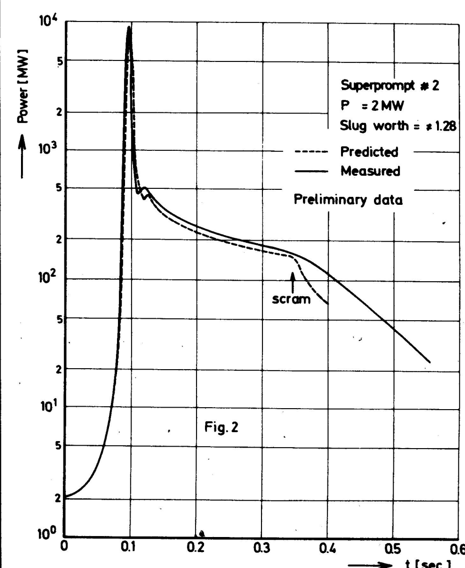
Fig. 1. Doppler-effect. E Neutronenergie. σ Werkzame doorsnede voor n-vangst van een uraniumkern. φ Neutronenflux. Bij een hoge temperatuur varieert de relatieve snelheid tussen een neutron van energie E en een uraniumkern sterker dan bij lage temperatuur, waardoor de resonantiepieken voor n-vangst breder zijn. Dienovereenkomstig vertoont de neutronenflux bij hoge temperatuur een breder maar minder diep dal[1].

Het Doppler-effect

U-238 bezit een groot aantal resonanties voor de vangst van neutronen. Wanneer de temperatuur van de splijtstof stijgt, zal de snelheid van de uraniumatomen in het UO_2-rooster toenemen. De relatieve snelheid tussen neutronen met een bepaalde energie en de U-238-kernen zal dan sterker gaan variëren. Dit heeft tot gevolg dat de resonanties zich verbreden; zie *fig. 1*. De oppervlakte van de resonanties blijft daarbij gelijk. De neutronenflux is in het energietraject van een resonantie lager dan daarbuiten, daar de werkzame doorsnede voor de absorptie in een resonantie erg hoog is. Ook deze depressie zal zich iets verbreden. Het netto resultaat van deze ingewikkelde samenhang is dat de absorpties (het produkt van werkzame doorsnede en neutronenflux) in het U-238 zullen toenemen waardoor k afneemt en de reactiviteit eveneens. U-235 heeft veel minder resonanties en dientengevolge levert het nauwelijks een bijdrage aan het Doppler-effect. Ook plutonium heeft een zeer klein Doppler-effect. Het Doppler-effect is daarom altijd negatief en snelwerkend.

Het effect van de Doppler-reactiviteit op excursies wordt duidelijk gedemonstreerd in *fig. 2*, waarin de resultaten van een test in een speciaal voor dit doel in de VS gebouwde snelle reactor (SEFOR) getoond worden. Door het uittrekken van een regelstaaf met een waarde van $\Delta k = 0{,}006$ loopt het vermogen zeer snel op. Na 70 ms begint het Doppler-effect zich te doen gevoelen, zodat bij 95 ms het vermogen met $P = 10^{10}$ W een maximum bereikt en terugloopt tot $P = 10^{8}$ W. Voor de zekerheid werd de reactor na 350 ms uitgeschakeld.

Fig. 2. Beperking door het Doppler-effect van een opzettelijk veroorzaakte vermogensexcursie van de proefreactor SEFOR. Reeds na 0,1 s wordt de toename van het vermogen omgezet in een afname. De reactiviteit bereikte een waarde van 1,28β (zie verg. (1)). Het experiment werd na 0,35 s beëindigd[2].



Dampbelreactiviteit

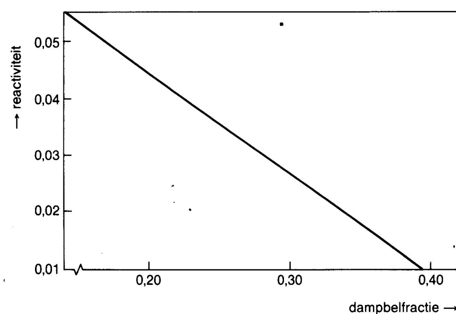
Er is een tweede terugkoppeleffect bij lichtwaterreactoren waardoor excursies beperkt zullen worden. Het koelmiddel – water – vormt tevens de moderator. Reactoren waarbij de splijtstof minder dan 10% is verrijkt, zullen zonder moderator altijd onderkritisch zijn. Tijdens een excursie zal met enige tijdsvertraging (veroorzaakt door de warmtecapaciteit en warmtegeleiding in de splijtstof) het koelmiddel gaan koken, waardoor uiteindelijk de reactor wordt uitgeschakeld. Bij drukwaterreactoren zal eerst de temperatuur van het koelmiddel oplopen. Daar water bij hogere temperaturen een lagere dichtheid heeft, is dit vrijwel equivalent met stoomvorming. De dampbelreactiviteit is het resultaat van een aantal effecten:

- Verandering van de neutronenvangst in water: bij een hogere dampbelfractie wordt deze lager; hierdoor stijgt de reactiviteit.
- Verandering van de kans dat de neutronen thermisch worden (resonantie-ontsnapkans): bij een hogere dampbelfractie wordt deze kans geringer (water is immers een goede moderator); hierdoor daalt de reactiviteit.
- Verandering van het spectrum van de thermische neutronen: bij een hogere dampbelfractie ontstaat een harder spectrum en worden meer neutronen in plutonium gevangen en minder neutronen in splijtingsprodukten; hierdoor stijgt de reactiviteit.
- Verandering in de neutronenlek: bij een hogere dampbelfractie stijgt de lekkage; hierdoor daalt de reactiviteit.

De dampbelcoëfficiënt is gevoelig voor de dichtheid van het water, de versplijtingsgraad, de verrijking, het aantal regelstaven in de kern en de hoeveelheid borium in het water.

Rond het werkpunt van de reactor kan de dampbelreactiviteit tamelijk nauwkeurig worden berekend met behulp van de storingstheorie. Voor de '*transient analysis*' moeten echter de gekoppelde berekeningen in hun geheel worden uitgevoerd.

Fig. 3. De reactiviteit van de reactor te Dodewaard als functie van de dampbelfractie.



In *fig. 3* is de berekende dampbelreactiviteit voor de reactor te Dodewaard uitgezet tegen de dampbelfractie. Tussen de condities zonder bellen en het werkpunt bij 35% dampbellen is er een verschil in reactiviteit van −0,04.

Warmtehuishouding bij een ongeval

Door reactiviteitsexcursies, maar ook door het uitvallen van de koeling of door chemische reacties, kan de splijtstof oververhit raken. Ruwweg kan men stellen (zie het artikel van Andriesse en Tanke in dit nummer) dat er onder 1500 K bij oxidische splijtstof geen splijtingsprodukten vrijkomen (een gedeelte van de splijtstof bevindt zich bij normaal bedrijf boven 1500 K; de vluchtige splijtingsprodukten worden dan door de bekleding tegengehouden). Reactoren kunnen op het niveau van de splijtstof veilig genoemd worden indien de temperatuur bij alle excursies niet boven deze waarde uitkomt. Zolang er water in de kern aanwezig is, zal dit niet het geval zijn.

Splijtingsenergie na uitschakelen; vervalwarmte

Wordt een reactor met $\varrho = -0{,}005$ onderkritisch, dan komt de nog geproduceerde splijtingsenergie overeen met die van 40 seconden vollast.

Bovendien is er nog een niet te verwaarlozen produktie van warmte als gevolg van de β-emissie van een groot aantal splijtingsprodukten. Deze vervalwarmte bedraagt na 100 s nog 4% van het oorspronkelijke vermogen. De vervalwarmte bedraagt gedurende een periode van 10^4 s het equivalent van 125 s op vol vermogen. De warmtecapaciteit tot 1500 K is slechts equivalent met 5-10 s op vol vermogen en tot het smeltpunt van UO_2 slechts met 30 s. De warmteafvoer moet dus gedurende een redelijke periode gewaarborgd zijn, wil een reactor veilig genoemd kunnen worden.

Chemische reacties met de splijtstofbekleding

De bekleding van de splijtstof van lichtwaterreactoren bestaat uit zircaloy. Dit materiaal reageert boven 1500 K met water, waarbij waterstof vrij komt en er 5-6 MJ warmte per kilogram zirconium wordt geproduceerd. De reactiewarmte vertegenwoordigt 0,9 MJ/kg splijtstof, of een temperatuurstijging van 3000 K. Dit komt overeen met 20 tot 40 s op vol vermogen.

Het negatieve effect van het zirconium kan met een factor tien gereduceerd worden door over te gaan op roestvast staal. De verbrandingswarmte van RVS is 1 MJ/kg, terwijl de bekleding slechts half zo dik kan zijn. De smelttemperatuur van RVS is echter slechts 1600 K en het materiaal absorbeert veel neutronen. Op lange termijn zou er een geheel keramische bekleding ontwikkeld kunnen worden. Het gevormde waterstof is een bron van mogelijke explosies indien het zich met lucht kan mengen.

Chemische reacties met lucht en water

Reacties met lucht en water vormen een negatief aspect voor met grafiet gemodereerde of met natrium gekoelde reactoren. Vooral na Tsjernobyl moet er een behoorlijk gewicht aan worden toegekend. De Duitsers zijn ervan overtuigd, dat het geen groot probleem is en dat grafietbranden door de vorm van het insluitsysteem en de beperkte luchttoevoer slechts een geringe invloed kunnen hebben. Grafietbranden kunnen met water gedoofd worden o.a. daar de reactie water-grafiet endotherm is. Grote natriumbranden zijn nog niet voorgekomen.

Warmteafvoer

Bij koelmiddelverlies in een lichtwaterreactor zijn de mogelijkheden tot warmteafvoer beperkt. De warmtecapaciteit van stoom is zeer gering, zodat er zeer sterke natuurlijke convectiestromen moeten optreden wil er van een redelijke koeling sprake zijn. De warmteoverdracht door straling is ook klein, daar de splijtstofstaven als een even zo groot aantal stralingsschilden dienst doen. Het is daarom van belang dat er zoveel mogelijk water in het reactorvat is.

De situatie is gunstiger wanneer de reactor is uitgerust met een zgn. noodcondensor. Bij een geschikte opstelling van de noodcondensor kan de kern tot een bepaald vermogen gekoeld worden door natuurlijke convectie. De noodcondensor kan mogelijk een lek ('by-pass') van het insluitsysteem vormen en moet dus zorgvuldig worden ontworpen. Vooral als ze bovendien de mogelijkheid hebben de reactor uit te schakelen – b.v. door toevoeging van borium in het primairzijdige water –, kunnen noodcondensors een belangrijke bijdrage leveren aan de inherente veiligheid van de reactor.

Barrières en retentie

Integriteit van het primaire systeem

Als het primaire systeem van een kernreactor intact blijft, kan er geen oververhitting van de splijtstof door verlies van koelmiddel ontstaan. De integriteit van het primaire systeem hangt af van het aantal en de aard van

de zwakke plekken. Hierbij zijn o.a. van belang:

- De keuze en verwerking van het materiaal.
- Het aantal lassen, het leggen van de lassen en de belasting van de lassen.
- De aansluitingen en doorvoeringen van het reactorvat.
- Het aantal pompen en afsluiters.
- Het aanwezig zijn van stoomgeneratoren.
- Het ontwerp van lasverbindingen in verband met mogelijkheden voor periodieke inspecties.

Door een goed ontwerp, een goede kwaliteitsbewaking en een goede bedrijfsvoering kan ervoor worden gezorgd dat de mogelijkheid van een ernstig verlies van koelmiddel vrijwel wordt uitgesloten.

Het insluitsysteem

Het insluitsysteem vormt een belangrijke bijdrage aan de inherente veiligheid mits het intact blijft en er geen sluipwegen tijdens een ongeluk zijn waardoor er splijtingsprodukten naar buiten kunnen komen. Een grote warmtecapaciteit in het insluitsysteem zal de druktoename beperken. Het moet ook zo zijn uitgevoerd dat het bestand is tegen de vrijkomende energie bij reactiviteitsexcursies en tegen waterstofbrand. Het lijkt erop dat de inherente veiligheid van een insluitsysteem belangrijk verhoogd kan worden door een afblaasmogelijkheid via filters die het aerosol tegenhouden.

De inhoud van het reactorvat en het primaire systeem

Een beïnvloeding van de veiligheid door de hoeveelheid koelmiddel is alleen zinvol indien de reactor zichzelf uitschakelt. Men kan erop vertrouwen dat de reactor indien nodig een noodstop zal uitvoeren, maar het noodstopsysteem is vrijwel altijd een actief systeem dat niet inherent veilig is. De nu volgende discussie beschrijft een situatie waarbij verlies van koelmiddel optreedt en bovendien de noodstop achterwege blijft. Bij kleine lekkages en grote inhoud van het primaire systeem is er een redelijke tijd ter beschikking voor een alternatieve noodstop, maar ook dit gebeurt weer met een actief systeem.

In de eindtoestand zal een gedeelte van het water uit het primaire systeem zijn weggelopen en een gedeelte zal zijn overgegaan in stoom. De boriumconcentratie in het water bij drukwaterreactoren zal zijn toegenomen. In het gunstigste geval zal er alleen stoom ontwijken. Dan zal er, tot de druk atmosferisch is geworden en als er verder geen warmte wordt toegevoerd, ca. 1/3 van de hoeveelheid water uit het primaire systeem als stoom zijn ontweken. De dichtheid van het water zal bij de lagere temperatuur ook anderhalf maal zo groot zijn geworden, zodat het volume van het water in het gunstigste geval na drukverlies slechts de helft van de inhoud van het primaire systeem is. De toename van de boriumconcentratie zal een gedeelte van de betere moderatie compenseren. Er zal zoveel vermogen geproduceerd worden, dat de dampbelfractie ongeveer 25% zal zijn, tot de boriumconcentratie zo hoog is, dat de reactor uitgeschakeld wordt of tot de kern droog komt te staan.

In een extreem geval verdwijnt het water niet in de vorm van stoom, maar loopt al het water gewoon weg. Dan wordt de veiligheid alleen gegeven door de inherente veiligheid van de splijtstof.

Retentie van splijtingsprodukten

Indien het tot een oververhitting van de kern komt, kan de hoeveelheid splijtingsprodukten die buiten de veiligheidsomhulling zouden kunnen komen, worden beperkt door een aantal natuurlijke processen. Het mengsel van stoom en splijtingsprodukten zal afkoelen in het insluitsysteem, waarbij zich een wolk zwevende deeltjes vormt (aerosol). Deze deeltjes zullen langzaam naar de bodem van het insluitsysteem zakken. Een gedeelte van de stoom zal condenseren op de koude wanden van het insluitsysteem. Een groot gedeelte van de aerosolen zal dan met het condensaat langs de wanden naar beneden stromen. Dit vereist wel dat het insluitsysteem gedeeltelijk intact moet blijven. Bij met gas gekoelde reactoren speelt dit proces geen rol.

Inherent veilige reactorontwerpen

Er zijn enkele reactorontwerpen die als inherent veilig worden gepresenteerd daar ze in het primaire systeem een zeer grote warmtecapaciteit hebben. Deze ontwerpen zijn er dan ook vooral op gericht de oververhitting van de kern tegen te gaan.

De HTGR

Bij moderatie door grafiet is de hoeveelheid grafiet in de kern (en dus de warmtecapaciteit) groot. Bovendien wordt bij de hoge-temperatuurreactor met gaskoeling (HTGR) een goede warmte-overdracht bereikt door de splijtstof homogeen met het grafiet te vermengen. Verder is de reactor ondergebracht in een slank vat, zodat door middel van straling een goede warmte-uitwisseling met de omgeving mogelijk is (*fig. 4*). Bij de storingen die men heeft doorgerekend, komt de temperatuur niet boven de faalgrens van de splijtstof en zullen er geen splijtingsprodukten vrijkomen.

Snelle met natrium gekoelde reactoren

Bij de met natrium gekoelde reactoren is de kern ondergebracht in een groot vat met gesmolten natrium. De temperatuur van dit natrium kan ca. 575 K stijgen voordat de kooktemperatuur wordt bereikt. De warmtecapaciteit is voldoende voor ca. 1000 s op vol vermogen. Ten koste van de kweekfactor zou deze reactor ontworpen kunnen worden met een negatief dampbeleffect in het centrum van de kern.

PIUS

Bij de alleen nog op papier bestaande PIUS-reactor (PIUS staat voor Process Inherent Ultimate Safety) wordt in de warmtecapaciteit voorzien door een groot vat met geboreerd water dat op kamertemperatuur wordt gehouden, te verbinden met het primaire systeem (*fig. 5*). Dit vat wordt gevormd door een cylinder van voorgespannen beton. Bij storingen zal het geboreerde water door natuurlijke convectie door de reactor stromen.

Verdediging in de diepte

De Westerse veiligheidsfilosofie bij kernreactoren voorziet in een verdedigingssysteem dat 'gestaffeld' is ('defence in depth'). Dat wil zeggen dat, wanneer een barrière faalt, de gevolgen worden opgevangen door een volgende.
De hierboven gepresenteerde 'inherent' veilige reactoren voldoen overigens in slechts beperkte mate aan dit vereiste. De HTGR heeft een moderator van brandbaar materiaal en het gasvormige koelmiddel heeft niet het voordeel dat het condenseert en daarmee een groot gedeelte van de splijtingsprodukten uitwast. Mogelijk kan echter door het toevoegen van brandvertragende middelen het brandgevaar sterk worden teruggebracht. Ook de met natrium gekoelde snelle reactoren bezitten een koelmiddel dat brandbaar is, en ze zijn 'gevoeliger' voor reactiviteitsongevallen dan lichtwater-reactoren. De PIUS-reactor is ontworpen voor standaard-splijtstof die met zircaloy is bekleed. Indien de temperatuur boven 1500 K komt, zal de zirconium-waterreactie plaatsvinden, waardoor de temperatuur nog verder stijgt. Het gevormde waterstof vormt, indien het met lucht in aanraking komt, een explosief mengsel.

Eén van de moeilijkheden met het concept van de verdediging in de diepte is dat bepaalde barrières niet nodig

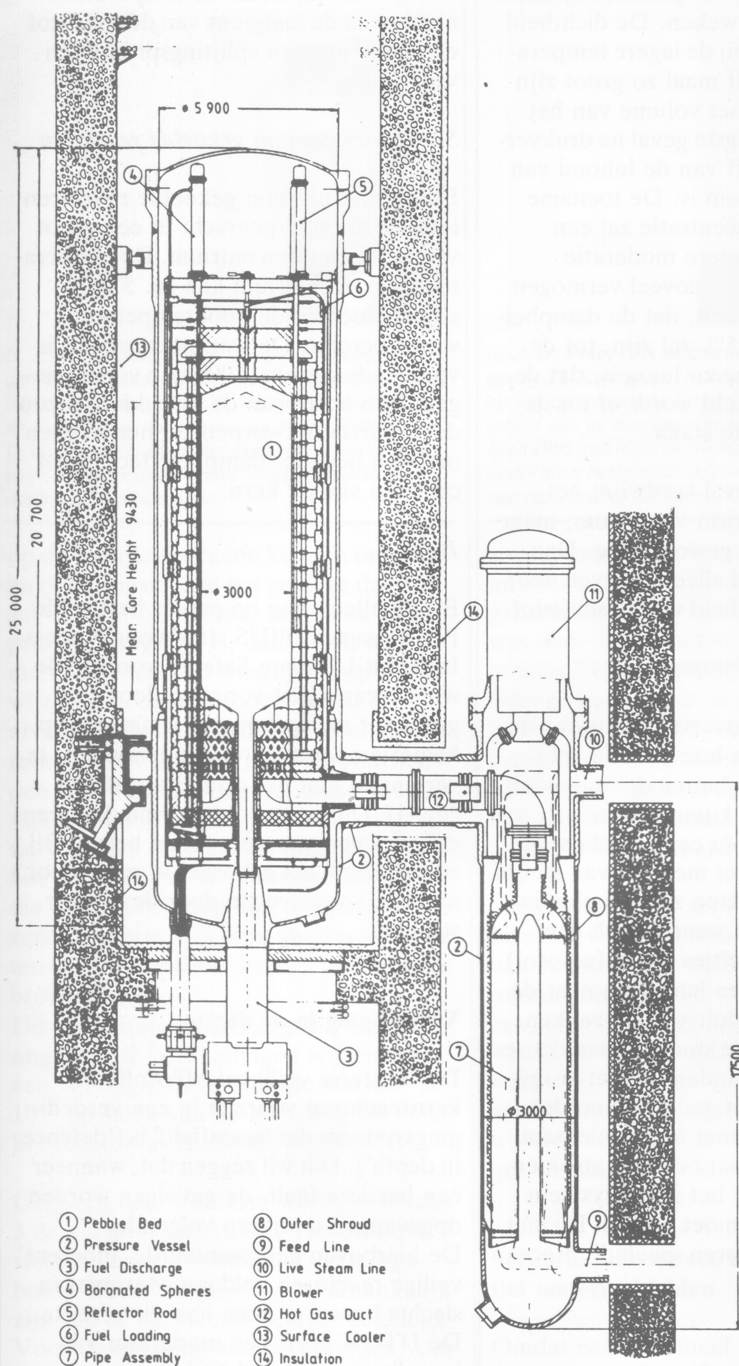


Fig. 4. Doorsnede van een HTGR-module (hoge-temperatuurreactor met gaskoeling) voor de productie van stoom[3].

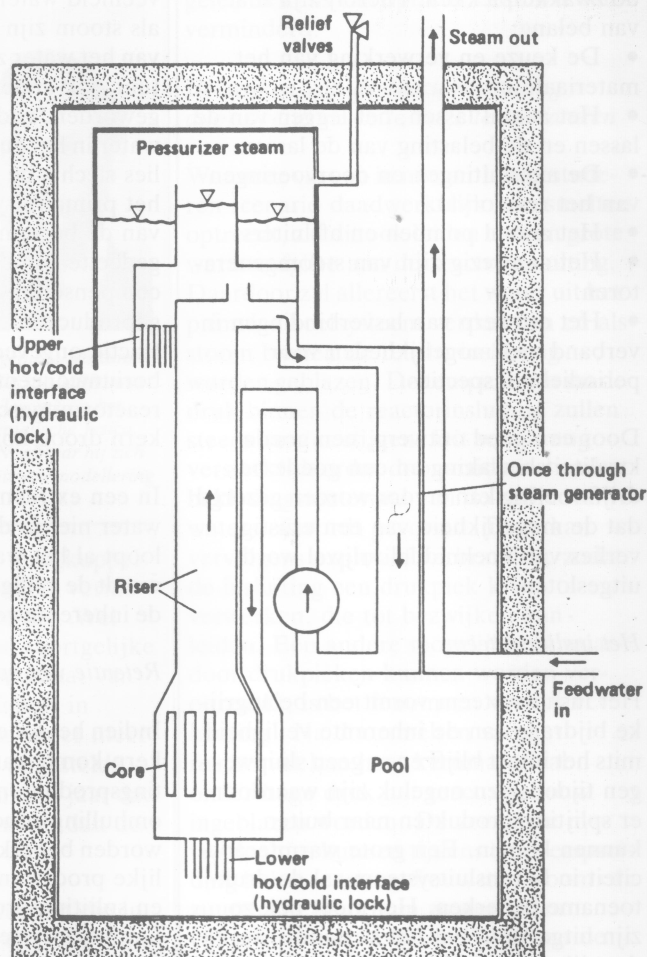


Fig. 5. Schematische doorsnede van de PIUS-reactor (Process Inherent Ultimate Safety)[4].

lijken, omdat men geen scenario's kan verzinnen die tot falen van de voorgaande barrières leiden. Zo zal bij de PIUS-reactor een bekledingstemperatuur van meer dan 1500 K alleen kunnen optreden bij een reactiviteitsongeluk of wanneer al het water uit het voorgespannen vat is gelopen.

* * *

De inherente veiligheid van kernreactoren wordt bepaald door de maximale energie die bij reactiviteitsexcursies kan vrijkomen, de warmtecapaciteit van de splijtstof en de integriteit van het primaire systeem en het insluitsysteem.

Bij de huidige generatie van Westerse kernreactoren is er een redelijke mate van inherente veiligheid aanwezig, die nog versterkt wordt door een groot aantal actieve systemen. Daardoor is een adequate mate van veiligheid gewaarborgd.

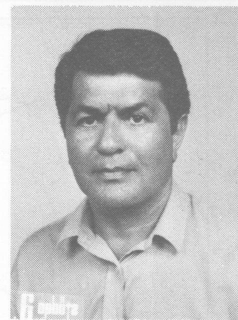
Referenties

1. G.I. Bell, and S. Glasstone, Nuclear reactor theory, reprint edition, Robert E. Krieger Publishing Company (Malabar), 1985.
2. W.J. Oosterkamp, H. Bogensberger and D. Wintzer, Transient tests in SEFOR, in Proc. Reaktorkonferenz Hamburg, 1972, Deutsches Atomforum (Bonn) 181.
3. G.H. Lohnert and G.R. Pflasterer. The new safety-related properties of the modular high-temperature reactor and its consequences on plant design, Transactions of the American Nuclear Society and the European Nuclear Society **47** (1984) 287.
4. D. Babala, Computer simulation of the thermohydraulic self-protecting properties of the SECURE-P (PIUS) primary system during severe transients, Transactions of the American Nuclear Society and the European Nuclear Society **47** (1984) 296.

Reactorruis

E. Türkcan

Dank zij de snelle ontwikkeling van apparatuur en programmatuur en van enkele decennia onderzoek is ruisanalyse uitgegroeid tot een belangrijk hulpmiddel voor de bewaking van de bedrijfsvoering van kernreactoren. Ruisanalyse draagt daarom bij tot de veiligheid van kernenergie, maar is daarnaast ook te gebruiken voor de bewaking van elk complex technisch proces. Ruisanalyse levert niet alleen vroegtijdige informatie over langzame veranderingen van bedrijfsprocessen, maar vormt in een aantal gevallen zelfs de enige eenvoudige, directe manier om de verandering in bepaalde fysische parameters te volgen.



E. Türkcan MSc., Nuclear Engineer, heeft natuurkunde en wiskunde gestudeerd aan de Universiteit van Istanbul (1962) en daarna Nuclear Engineering aan de Technische Universiteit van Istanbul (1963). Gedurende het studiejaar '64/'65 heeft hij gestudeerd aan het Philips International Institute te Eindhoven. Vanaf 1965 is hij werkzaam bij het ECN bij de Afdeling Fysica. Hij heeft aanvankelijk experimenteel onderzoek gedaan op het gebied van reactordynamica en veiligheidsaspecten. Daarna werd hij projectleider Signaalanalyse ten behoeve van reactorveiligheid en fysische experimenten.

Bewaking van kernreactoren via ruis

Een kerncentrale of een experimentele reactor is uitgerust met allerlei opnemers die hun signalen doorgeven aan de bedrijfstechnici of aan de beveiligingsapparatuur. Op de signalen zijn in het algemeen kleine, onregelmatige fluctuaties gesuperponeerd. Dit noemen we 'reactorruis'. Deze ruis vindt voor een groot deel zijn oorsprong in de reactor zelf. De mechanismen hierbij zijn goeddeels bekend. De karakteristieken van die mechanismen en de karakteristieken van de wegen waarlangs die fluctuaties in de meetsignalen terechtkomen, vindt men in de ruis terug.

Met de geavanceerde methoden voor ruisanalyse die tegenwoordig beschikbaar zijn, is het nu mogelijk om, zonder het functioneren van de reactor te beïnvloeden, informatie te verkrijgen over de reactorprocessen via de ruis die ze produceren, of via de 'bewerkingen' die ze op de ruis uitvoeren. Deze informatie is langs directe weg vaak veel moeilijker te verkrijgen. Het aantal fysische effecten dat specifieke ruis-'signaturen' oplevert, is groot. Aan de hand van een aantal concrete voorbeelden zal dit worden toegelicht.

In Nederland is het onderzoek aan reactorruis begonnen met de komst van de eerste onderzoekreactor in 1961. Alle nucleaire instituten hebben aan de ontwikkeling bijgedragen en onderzoek gedaan aan verschillende reactortypen. In de jaren '60 was het onderzoek vooral gericht op onderzoekreactoren met laag vermogen en op subkritieke 'experimenten'. Het ging vooral om het bepalen van de kinetische parameters van de reactor, zoals de levensduur van de neutronen, de mate waarin de reactor subkritiek is of de koppelingsparameters in zwakgekoppelde geometrie. Een overzicht geeft ref. [1].

Later – in de jaren '70 – is het accent verschoven naar het onderzoek aan vermogensreactoren. De doelstellingen zijn van fysisch meer technologisch geworden. In grote lijnen zijn de toepassingen bij een kerncentrale gericht op de volgende vier punten:

- Het bepalen van fysische parameters of dynamische karakteristieken van de reactor, zoals reactiviteitscoëfficiënten, stromingssnelheden, mechanische trillingsverschijnselen enz.
- Identificatie van de ruisbronnen en de voortplanting van de ruis door het systeem.
- Het bewaken van reactorcomponenten: een afwijking van de verwachte toestand betekent een vroegtijdige waarschuwing voor onregelmatigheden.
- Het bewaken van de goede werking van de opnemers in de reactor en van de meetketens.

De methoden zijn ook toegepast voor bestralingsexperimenten van splijtstof in onderzoekreactoren (zoals de HFR). Daarbij werden thermohydraulische karakteristieken gemeten of bewaakt. In de jaren '80 is de aandacht gericht geweest op de verdere ontwikkeling en toepassing, 'on-line' en 'in real-time'. De toekomstige ontwikkeling is in belangrijke mate gericht op het bewaken van processen door middel van automatische patroonherkenning en door gebruik te maken van expertsystemen.

Methoden

Voor de analyse van de fluctuaties staan bij het ECN geavanceerde hulpmiddelen ter beschikking[2]. Signalen van de reactor (kerncentrale te Borssele, HFR te Petten) worden ter plaatse geconditioneerd en vervolgens overgebracht naar de afdeling Fysica van het ECN (9600 baud-telefoonlijn). Daar staat analyseapparatuur, bestaande uit de computers PDP 11/24 en VAX-750, gekoppeld met een array-processor voor het rekenintensieve deel van de analyse.

De analyse vindt plaats in het frequentiedomein. Hiervoor dient een multi-variaat (voor maximaal 32 kanalen) programma voor spectrumanalyse (FAST genaamd), dat frequentieverdelingen van de signalen bepaalt en matrices van frequentiespectra (dat wil zeggen autospectra en kruisspectra, simultaan) en van correlatiefuncties. Hierna kunnen verdere bewerkingen worden uitgevoerd om spectra te bepalen van gemeenschappelijke componenten in verschillende signalen of spectra van componenten die juist niet gemeenschappelijk zijn (onder andere met de methode van partiële en multipele coherentie, waarvoor een speciale algoritme werd ontwikkeld, die geen problemen geeft bij slecht geconditioneerde matrices).

Een andere methodiek is de aanpassing van de signalen aan een model in het tijddomein. Het meest gebruikelijk is een autoregressie(AR-)model waarin de laatste waarde van een fluctuatie wordt uitgedrukt in een lineaire combinatie van waarden op een reeks tijdstippen in het verleden, met witte ruis als 'drijvende kracht'. Ook hiervoor bestaan multivariate rekenprogramma's. Hierop aansluitend zijn er methoden beschikbaar voor identificatie van de ruisbronnen in het systeem en de voortplanting van de fluctuaties door het systeem (berekening van 'noise contribution ratios' en zgn. 'signal transmission path'-analyse). Ook kunnen voor een aangepast AR-model dynamische systeemkarakteristieken worden bepaald, zoals overdrachtsfuncties of responsies op een stapvormig ingangssignaal.

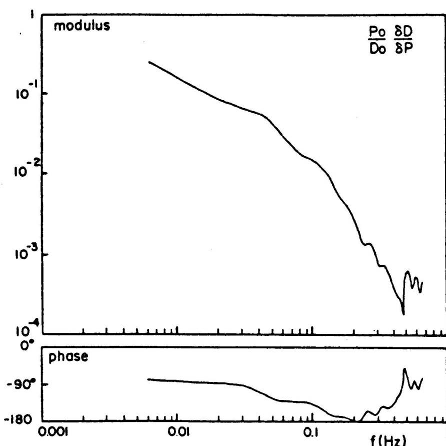


Fig. 1. Overdrachtfunctie tussen reactorvermogen en druk in het drukvat, gemeten voor de reactor te Dodewaard[3]. De analyse is gemaakt met een autoregressiemodel voor drie variabelen, te weten druk, stoomdebiet en neutronenflux als maat voor het vermogen. Uit de 'noise contribution ratio' kon de overdrachtfunctie tussen twee variabelen worden verkregen.

Dit soort analysemethoden met de daarbij gebruikte apparatuur en programmatuur zijn uiteraard niet alleen toepasbaar op reactoren, maar ook op vele andere systemen. Een fraai voorbeeld hiervan bij het ECN is de toepassing voor de dynamische analyse van windturbines.

Voorbeelden

Er volgt nu een greep uit de mogelijke toepassingen, waarin allerlei aspecten van de reactor aan de orde komen: reactorfysische, mechanische en thermohydraulische. De eerste acht verkeren grotendeels in het laboratoriumstadium. Het onderzoek daaraan vond en vindt plaats bij de KEMA (Dodewaard), het IRI (Dodewaard en HOR) en het ECN (Borssele en HFR). De laatste drie toepassingen zijn commercieel; daarvoor bestaat speciale apparatuur.

Dynamisch gedrag van een kokendwaterreactor (BWR)

Ruisanalyse geeft de mogelijkheid het dynamisch gedrag van een systeem te bepalen. In een BWR is het kookverschijnsel in de reactorkern de voornaamste bron van de ruis. Dit veroorzaakt enerzijds fluctuaties in de vermenigvuldigingsfactor – die fluctuaties in vermogen, temperatuur en druk in de hele reactor tot gevolg hebben (globale ruis) – anderzijds worden verstoringen in de omgeving van detectors teweeggebracht (lokale ruis). Uit de globale ruis zijn overdrachtsfuncties af te leiden, b.v. tussen stoomdruk, neutronendichtheid en koelmiddelstroom, of voor regelelementen. Deze functies geven de stabiliteit van een systeem aan. In Duitsland en Frankrijk worden overdrachtfuncties (zowel voor koude als warme reactor) geëist bij het verlenen van een bedrijfsvergunning van nieuwe reactoren. In Nederland is onderzoek verricht aan de reactor in Dodewaard door het IRI en de KEMA; zie *fig. 1.*

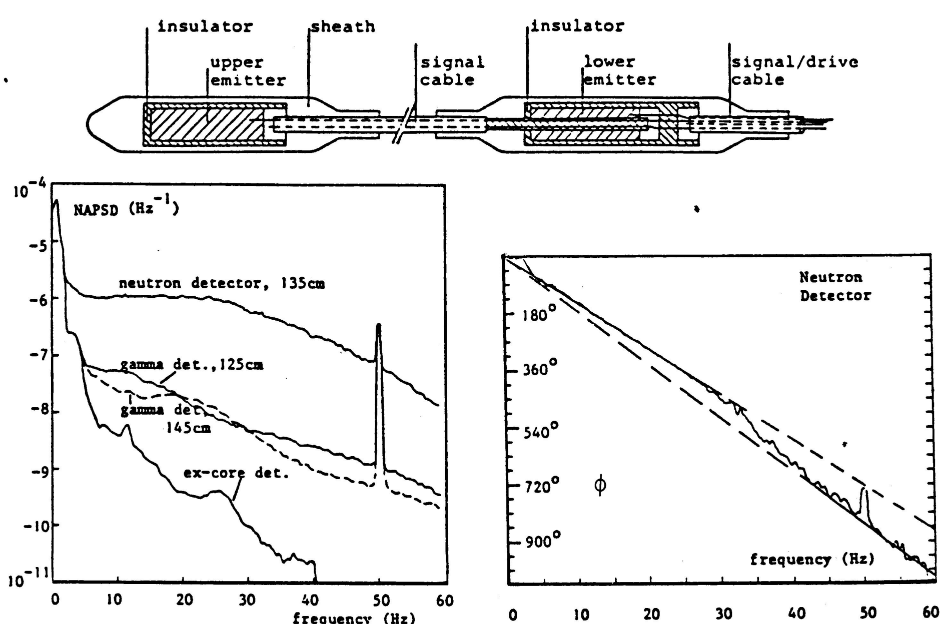


Fig. 2. Meting van de stromingssnelheid in een BWR[4]. Door IRI is een speciale tweeling-detector ontwikkeld, die kan worden aangebracht in een verticale instrumentatiebuis in de reactorkern. De bovenste figuur toont het instrument. Ieder der twee detectors bestaat uit één elektrode van een materiaal dat bij n-vangst een β-deeltje uitzendt. De andere elektrode collecteert deze deeltjes, zodat er een stroom gaat lopen die afhangt van de neutronenflux. De figuur linksonder toont een aantal typische frequentiespectra. De snelheid wordt gevonden uit de fase ϕ van het kruisspectrum van de twee opnemers. Voor een snelheid behoort deze lineair met de frequentie f te verlopen ($\phi = 2\pi f\tau$, waarin τ de looptijd tussen de opnemers is). In de onderhavige meting herkent men twee snelheden, die ruwweg met die van stoom en van water kunnen worden geïdentificeerd.

Thermohydraulische bewaking van een BWR

Met voor neutronen of gammaquanta gevoelige detectors kan de stromingssnelheid door de reactorkern worden bepaald. De lokale ruis wordt dan gebruikt. Dit wordt gedemonstreerd in *fig. 2*. Hieraan kan men ook zien dat uit zulke metingen informatie over de twee-fasenstroming wordt verkregen.

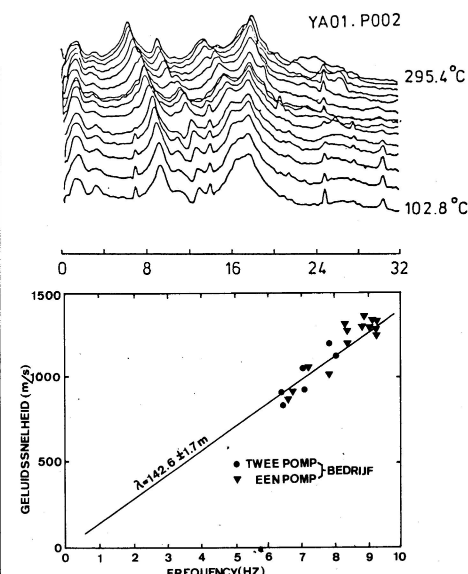
Thermohydraulische bewaking van een drukwaterreactor (PWR)

Ook hier zijn stromingssnelheden te bepalen, gebruik makend van fluctuaties in temperatuur en vermogen met behulp van thermokoppels of neutronenopnemers. Dit wordt in Borssele toegepast. Men kan zo het in-stand-blijven van de juiste stroming controleren. Dat kan overigens ook uit de ruis van thermokoppels boven de kern: een blokkering, oververhitting of plaatselijk koken verhoogt de temperatuurruis. Een andere interessante waarneming is het ontstaan van een staande drukgolf in het geheel van de beide koelkringlopen; zie *fig. 3*. De resonantie van de 150 meter lange orgelpijp laat in één oogopslag een controle van de koelkringloop toe.

Mechanische trillingen in een PWR

Is in een BWR de kookruis dominerend, in een PWR zijn de hydraulische en mechanische trillingen overheersende ruisbronnen. Eén voorbeeld daarvan is

Fig. 3. Een staande drukgolf van een drukwaterreactor[5]. De bovenste figuur laat een reeks van frequentiespectra zien van drukfluctuaties in het primaire koelsysteem (verticaal verschoven), opgemeten tijdens het opwarmen van de reactor, dus bij oplopende temperaturen. Men ziet een van de pieken verschuiven van 9 naar 6,5 Hz. De resonantiefrequentie blijkt evenredig met de geluidssnelheid van het medium, met een lengteconstante precies gelijk aan de totale lengte van het koelcircuit, zoals de onderste figuur toont.



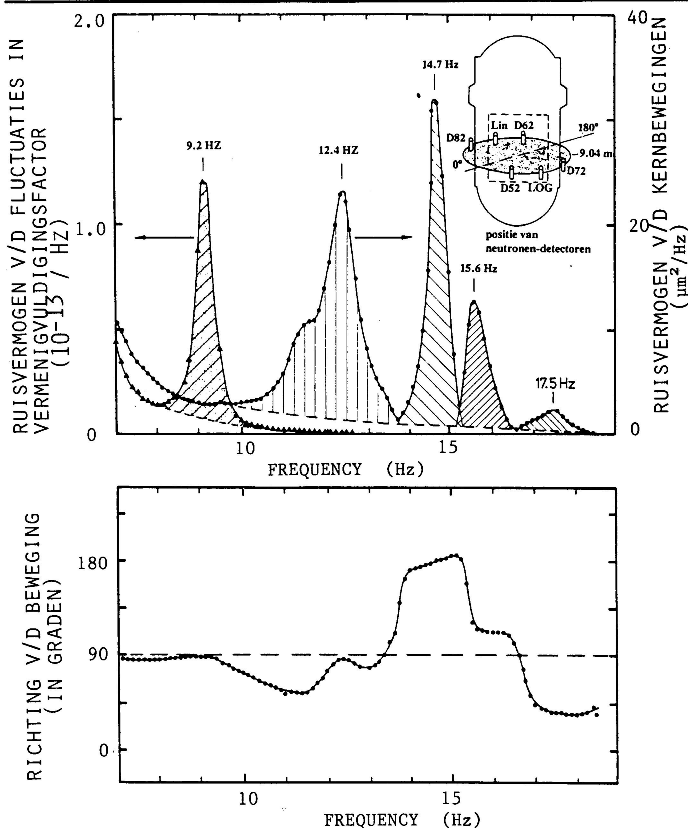


Fig. 4. Kernbewegingen bij de reactor te Borssele[2]. De reactorkern is opgehangen in de z.g. 'core barrel', die kleine slingerbewegingen uitvoert ten opzichte van een zestal neutronendetectors rondom het drukvat (zie inzet). Men kan zich voorstellen dat de verdeling van de neutronenflux, die naar buiten toe een vrij sterke gradiënt heeft, over die detectors heen oscilleert en daarmee fluctuaties in de signalen induceert die heel specifieke relaties vertonen tussen amplitude en fase. Daarvan gebruik makend kan het bewegingsspectrum van de kern worden afgeleid uit een spectrumanalyse (met alle kruisspectra) voor zes detectors. De bovenste figuur toont het spectrum van de amplituden (rechterschaal), de onderste de bewegingsrichtingen. Men lette op de opmerkelijke hoge gevoeligheid van de detectie. Een andere ruiscomponent wordt gekenmerkt door hoge onderlinge coherentie voor de verschillende detectors en de afwezigheid van faseverschillen. Dat wijst op een reactiviteitsruis, door fluctuaties in de vermenigvuldigingsfactor. De piek bij 9,2 Hz is op grond van die kenmerken geïsoleerd.

de slingerende beweging van de reactorkern, die in *fig. 4* wordt gedemonstreerd. Zo'n meting geeft uitsluitsel over eventueel losraken van de ophanging van de 'core barrel', wat enkele malen is gebeurd (niet in Nederland). Eén van die gebeurtenissen was in 1974 voor de Kernfysische Dienst van het Ministerie van Sociale Zaken aanleiding het ECN te verzoeken de ruis van Borssele te onderzoeken.

Mechanische trillingen in een BWR

Deze vormt een minder belangrijke ruisbron, tenzij de trillingen erg sterk worden. Dat is in het verleden gebeurd (Japan, V.S.) voor instrumentenbuizen in sommige BWR's, hetgeen zelfs enige schade opleverde. Uit de ruis van de neutronendetectors in die buizen waren de trillingen goed te meten.

Reactiviteitsruis in een PWR

In Borssele en in alle PWR's zijn duidelijke spectrumpieken door reactiviteitsfluctuaties gevonden (globale ruis). *Fig. 4* laat dat zien. Uit de relatie tussen dit effect en de bijbehorende drukfluctuatie is de reactiviteitscoëfficiënt voor druk- (of dichtheids-)veranderingen af te leiden, die sterk afhankelijk is van de mate van versplijting van de kern en de boorzuurconcentratie van het koelwater.

Bewaking van meetkanalen tijdens bedrijf

Voor temperatuurmetingen is het in-situ en tijdens bedrijf bepalen van de tijdconstanten van thermokoppels van belang. *Fig. 5* laat dat zien. Ook ionisatiekamers kunnen tijdens bedrijf worden gecontroleerd met voldoend gevoelige instrumentatie. Dit is te zien in *fig. 6*.

Thermohydraulica in splijtstofexperimenten

In bestralingsexperimenten is als volgt informatie over het thermohydraulische gedrag te verkrijgen. De neutronenfluxruis van de reactor (meetbaar, want die ruis is globaal over het van belang zijnde frequentiegebied) is de bron van vermogensfluctuaties van de geteste splijtstofstaaf, de fluctuaties in temperaturen en thermische uitzettingen zijn de responsie. Uit de overdrachtsfuncties, of uit stapresponsie via meerkanaals autoregressie-analyse, is informatie te verkrijgen, bruikbaar voor modelverificatie; zie *fig. 7*. Deze methode is thans in gebruik bij het beproeven van verschillende soorten geavanceerde splijtstof in bestralingsexperimenten in de HFR te Petten.

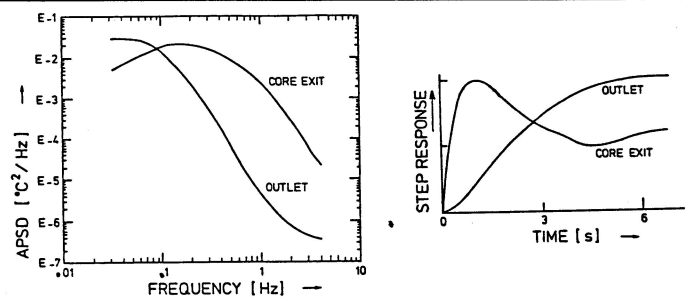


Fig. 5. Beproeving van thermokoppels[2]. Als het spectrum van de temperatuurfluctuaties als 'wit' mag worden beschouwd, geeft het spectrum van de thermokoppelsignalen de overdrachtfunctie van de opnemer weer (linkerfiguur; voor twee koppels van verschillende afmetingen). Reactortechnici zijn meer gewend aan responsies van de opnemers op een temperatuursprong. Die kunnen ook uit de ruis worden afgeleid: pas een autoregressiemodel aan de meetsignalen aan en bereken de stapresponsies voor het aangepaste model (rechterfiguur). Deze meting wordt dagelijks voor Borssele uitgevoerd.

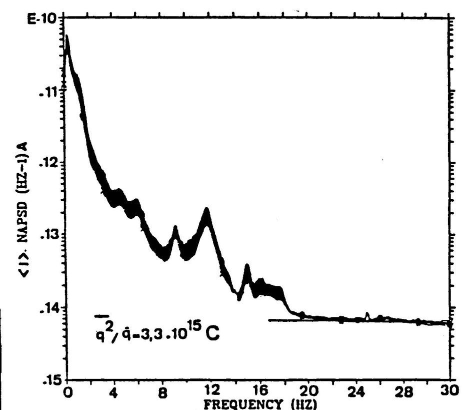


Fig. 6. Controle van de werking van ionisatiekamers[3]. Bij hoge frequenties is de enige ruis van een ionisatiekamersignaal de witte ruis ten gevolge van de detectie van discrete deeltjes ('schrooteffect'). Het ruisniveau wordt bepaald door $\overline{q^2}/\bar{q}^2$, waarin q de lading is, verzameld per gedetecteerd neutron. De hoogte van dit niveau geeft dus een indicatie voor correcte werking. De figuur laat dit zien voor vier gelijksoortige ionisatiekamers op verschillende hoogte ten opzichte van de reactorkern. (De responsies vallen binnen de dikte van een getekende curve.)

Bewaking van draaiende machines

Dit is een welbekende methode; eventuele onbalans in een generator, turbine of pomp geeft trillingssignalen op b.v. versnellingsopnemers. Bij de metingen door het ECN van de signalen van de reactor te Borssele worden ook die van versnellingsopnemers op de hoofd-koelmiddelpompen opgenomen.

Bewaking van veiligheids- en regelkleppen

Een goede indicatie van de vloeistofstroom door een klep wordt gegeven door de akoestische ruis, gemeten aan die klep.

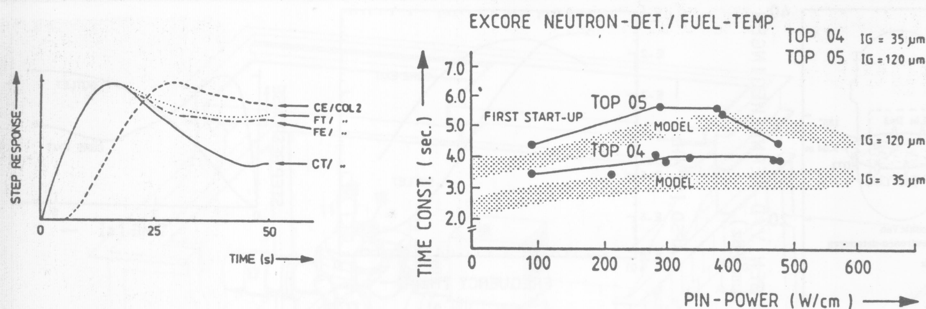


Fig. 7. Tijdconstanten van een verse splijtstofpen in een bestralingscapsule in de HFR[6]. Gemeten zijn de fluctuaties in de neutronenflux, temperaturen en verlenging. Uit bivariate analyses zijn responsies van temperaturen (*FT* = 'fuel'-temperatuur, *CT* = natrium-koelmiddeltemperatuur) en van verlengingen (*CE* voor 'cladding', *FE* voor splijtstof) op een stapvormige input berekend (linkerfiguur). De zo bepaalde tijdconstanten als functie van het vermogen van de pen zijn in de rechterfiguur vergeleken met modelberekeningen (gestippelde band), voor pennen met verschillende spleetbreedte IG tussen splijtstof en 'cladding'.

Detectie van losse onderdelen

Bij het opnemen van de geluiden van botsingen van losse onderdelen in een systeem (b.v. een stoomgenerator) tegen de wand, kan door middel van ruisanalyse de positie en het gewicht van dat onderdeel worden bepaald[7]. Hierbij kan worden gedacht aan vergeten gereedschap en losgeraakte onderdelen. De detectiegrens ligt bij ongeveer 20 gram. In veel landen is apparatuur voor deze detectie verplicht. Ook de kerncentrale te Borssele beschikt daarover, al is dat meetsysteem (nog) niet geïntegreerd met het ruissysteem van het ECN.

Nieuwe ontwikkelingen

De enorme ontwikkeling van computertechnologie en informatica zal van grote invloed zijn op de toepassing van reactorruisanalyse. Zoals uit de gegeven voorbeelden blijkt, gaat het vaak om het detecteren van veranderingen in de 'signaturen' van de ruis. Die signaturen zijn karakteristieken van spectra of reeksen parameters van aangepaste modellen. Sommige veranderingen zijn normaal (b.v. gerelateerd aan de boorzuurconcentratie), andere wijzen op zich ontwikkelende storingen. Tot nu toe gebeurt de beoordeling van de signaturen op het oog, door deskundigen. De methode zal zeer aan kracht winnen als die beoordeling kan worden geautomatiseerd. Daarvoor worden nu op verschillende plaatsen in de wereld plannen gemaakt voor toepassing van automatische patroonherkenning. De resultaten worden dan direct, zonder tussenkomst van een ruisdeskundige, aan de reactorbedrijfsleiding gepresenteerd. De ruisanalyse zal dan deel uitmaken van de expertsystemen voor bewaking van reactoren en diagnose bij eventuele storingen, en aldus bijdragen aan de veiligheid.

Dankbetuiging

De auteur betuigt zijn dank aan dr. J.B. Dragt voor de vele goede adviezen bij het tot stand komen van dit artikel.

Referenties

1. J.B. Dragt, Reactorruis, Atoomenergie, Juni 1969, 151.
2. E. Türkcan, Review of Borssele PWR Noise Measurements and interpretation, Prog. of Nucl. Energy **9** (1981) 437.
3. E.B.J. Kleiss, On the determination of Boiling Water Reactor Characteristics by Noise Analysis, Proefschrift Delft, 1983.
4. E.B.J. Kleiss, W.J. Oosterkamp en W.H.M. Nissen, Experience with Incore Neutron and Gamma Dectors for BWR Coolant Velocity Measurements, Prog. in Nucl. Energy **15** (1985) 735.
5. E. Türkcan, On-Line Monitoring of a PWR for Plant Surveillance by Noise Analysis, Prog. in Nucl. Energy **15** (1985) 365.
6. E. Türkcan en J.E. de Vries, Application of Noise Analysis in Fuel Pin Research, ECN-195 (1987).
7. R.C. Kryter, Loose part monitoring programs and recent operational experience in selected U.S. and Western European commercial nuclear power stations, NUREG/CR 3687, 1984.

Boekbespreking

Harry J. Lipkin, Quantum Mechanics. New Approaches to Selected Topics, North-Holland, Amsterdam, 1986, xvi + 466 blz, ƒ 75,00.

Als iedereen grensverleggend bezig is raakt het binnenland onbewoond en groeit er onkruid tussen de rails die de verschillende fronten moeten verbinden. Dat geldt ook voor het gebied van de natuurkunde. Teksten waarin specialistische onderwerpen voor vakgenoten met een wat andere belangstelling toegankelijk worden gemaakt, zijn zeldzaam. Vandaar dat een ongewijzigde heruitgave, nu als paperback in de 'North-Holland Personal Library', van dit oorspronkelijk in 1973 verschenen boek gerechtvaardigd is, evenals een korte bespreking ervan.

De vijftien hoofdstukken van het boek zijn in acht groepen ingedeeld, die ieder als een zelfstandige monografie over een bepaald onderwerp opgevat kunnen worden. Het eerste onderwerp, de polarisatie van fotonen, wordt in navolging van Dirac (als eenvoudig analogon van de diffractie van licht door een dubbele spleet) gebruikt als een korte inleiding tot de basisconcepten van de quantummechanica. Deze inleiding vergt zeer weinig voorkennis. Het tweede onderwerp is het Mössbauer-effect, dat door de auteur als een didactisch voorbeeld van 'form factor physics' behandeld wordt. Twee onderwerpen waaraan de auteur veel aandacht schenkt, zijn het veel-deeltjesprobleem (met een vroegtijdige introductie van de zgn. tweede quantisering en met allerhande doorkijkjes naar de vaste-stoffysica en de kernfysica) en de relativistische quantummechanica (met discussies van de Dirac-vergelijking en van de Lorentz-groep als hoogtepunten). Andere onderwerpen die aan de orde komen, zijn het verval van het K-deeltje (als een voorbeeld van 'the "dirty" real world of everyday applications of quantum mechanics to frontier research problems') S-matrix theorie, en Feynman-diagrammen (inclusief polaronen en renormalisatie).

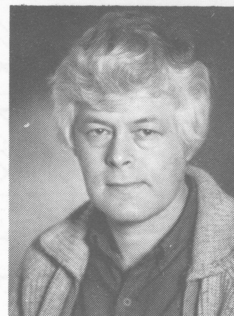
De auteur benadrukt de eenheid van de quantummechanica door voortdurend aan te geven hoe technieken en benaderingen die ontwikkeld zijn voor één probleem, ook in andere gevallen bruikbaar zijn. De behandelingswijze wordt in zeven van de acht deeltitels aangeduid met de toevoeging 'for pedestrians' (die in de titel van het geheel misschien beter op zijn plaats zou zijn geweest). Daarmee wordt bedoeld dat de lezer niet te veel bagage nodig heeft, en dat de aandacht niet gericht is op formele aspecten maar eerder op een zo vroeg mogelijke toepassing van concepten en technieken op concrete problemen. Het mes snijdt dan aan twee kanten: men leert een onderwerp kennen, en al doende begrijpt men de quantummechanica zoals die feitelijk toegepast wordt, beter.

De samenhangende hoeveelheid praktische kennis die dit didactisch meesterwerk binnen bereik brengt, is indrukwekkend. Daar kan geen holist tegenop. Dat de auteur daarbij de historische ontwikkelingen niet gevolgd heeft maar ten volle gebruik heeft gemaakt van de efficiënte beschrijvingen die in retrospect mogelijk zijn, is onvermijdelijk, al zou dit niet tot het volledig ontbreken van verwijzingen naar de oorspronkelijke literatuur hebben hoeven te leiden. De prijs van deze herdruk is aan de stevige kant, hetgeen het aantal lezers, vooral onder studenten, zal beperken.

A. Compagner

Verspreiding van splijtingsprodukten bij een kernsmeltingsongeluk

C.D. Andriesse en R.H.J. Tanke



Dr. C.D. Andriesse (1939) studeerde technische natuurkunde te Delft en promoveerde daar in 1969 op onderzoek van neutronenverstrooiing. Van 1971 tot 1980 werkte hij in Groningen aan astrofysische problemen. Sindsdien is hij bij de KEMA betrokken bij onderzoek van materiaalproblemen bij de elektriciteitsproduktie, vanaf 1986 als afdelingshoofd. Dr. Andriesse trad op als redacteur van een handboek over vraagstukken bij kernenergie.



Drs. R.H.J. Tanke (1957) studeerde experimentele fysica aan de Rijksuniversiteit Utrecht. Hij werkte tijdens zijn studie een jaar bij het Kernforschungszentrum Karlsruhe en nadien als projectleider Radiotherapie-simulator bij Oldelft te Delft. Hij coördineert op dit ogenblik bij de KEMA de werkzaamheden voor het brontermexperiment. Drs. Tanke is voorzitter geweest van de Kernenergievereniging Nederland.

Door splijting van uraniumkernen in een kernreactor ontstaan, als nevenprodukt van de vrijgemaakte energie, radioactieve isotopen van ca. 30 chemische elementen, de splijtingsprodukten. Zowel de splijtingsreacties als de splijtingsprodukten moeten worden beheerst, wil kernenergie een bruikbare energiebron zijn. De radioactiviteit van de splijtingsprodukten is het gevolg van een neutronenoverschot in de atoomkern, dat alleen door natuurlijk verval van neutronen in protonen verdwijnt. Bij dit verval worden snelle elektronen en gammafotonen uitgezonden, die biologische schade kunnen veroorzaken, alsmede neutrino's. Het beheersen van de splijtingsprodukten kan daarom alleen bestaan uit het afschermen van hun straling en uit het verhinderen van hun verspreiding gedurende de periode waarin ze vervallen, opdat de biologische schade zo klein is als redelijkerwijs kan worden verlangd. In dit artikel beschrijven wij experimenteel onderzoek naar de verspreiding van splijtingsprodukten binnen een kerncentrale die, na een ongeluk waarbij de kern smelt, ondanks verhinderende constructies bij een ernstige onbalans van de opgewekte en de afgevoerde energiestroom mogelijk is.

De splijtingsprodukten ontstaan *in* de splijtstof. Dit vormt een belangrijke belemmering voor de verspreiding. Is deze belemmering deels of geheel verdwenen, door oververhitting, vergruizeling, smelting of verdamping, dan verspreiden de splijtingsprodukten zich door (delen van) het koelsysteem van de reactor, vervolgens door het insluitsysteem dat daar voor de veiligheid omheen is gebouwd, en ten slotte via eventuele scheuren of gaten van het insluitsysteem in de omgeving. Enerzijds wordt de verspreiding bepaald door eigenschappen van de damp en van het aerosol van stofdeeltjes die zich uit de splijtstof ontwikkelen, anderzijds wordt zij bepaald door omstandigheden in het pad door het koelsysteem, het insluitsysteem en de eventuele lekken daarvan. Dit leidt tot een ingewikkelde problematiek, die eerder door Bustraan in dit tijdschrift is beschreven[1]. Wat de verspreiding van de damp betreft, is het voornaamste probleem dat van de oplosbaarheid van het schadelijke jodium (met de moleculaire vormen waarin het kan voorkomen) in het koelwater (met de verontreinigingen en zuurgraden waarin het kan voorkomen als het via stoom in het insluitsysteem is gecondenseerd). Wat de verspreiding van het aerosol betreft, is het voornaamste probleem dat van de tijd die voor uitzakking op vloeren of aanplakking op wanden beschikbaar is voordat het insluitsysteem gaat lekken. De problematiek is onlangs in alle complexiteit besproken door Wilson en anderen[2].

Verspreiding van aerosol

Wij zijn nauw betrokken geweest bij experimenteel onderzoek van de verspreiding van een niet-radioactief, maar overigens representatief aerosol in het koelsysteem van de kernreactor te Marviken (Zweden)[3]. Doordat het koelsysteem een relatief klein volume heeft, ontstaat er bij een ongeval een dicht aerosol ($\approx 0{,}1$ kg m^{-3}), waarin de deeltjes flink groeien (massamediane doorsnede $d_{1/2} \approx 10^{-5}$ m). Het wordt meegevoerd in een opwaartse stroming van stoom en lucht, die langzaam is in de vaten (gassnelheid $v_g \approx 0{,}03$ m s^{-1}) en snel in de pijpen. Dat onderzoek heeft aangetoond dat na een breuk in het koelsysteem ruwweg de helft van het gevormde aerosol achterblijft en de andere helft vrijkomt, wat wijst op de overheersende invloed van uitzakking.

Dit blijkt uit het volgende argument. Uitzakking wordt veroorzaakt door de zwaartekracht, en vindt plaats met een snelheid v_s die gegeven wordt door de formule van Stokes:

$$v_s = \varrho g d^2/(18\,\eta).$$

Hier is g de versnelling van de zwaartekracht, ϱ de massadichtheid en d de doorsnede van een deeltje en η de viscositeit van het gas waardoor het valt. Overtreft de neerwaartse valsnelheid v_s de opwaartse gassnelheid v_g, dan zakt het deeltje uit. Dit gebeurt met deeltjes waarvoor geldt:

$$d > (18\,\eta v_g/(\varrho g))^{1/2} = 2 \times 10^{-5}\ \text{m}.$$

De waarde geldt voor experimentele, representatieve grootheden van η, ϱ en v_g in vaten van het koelsysteem. Deze waarde is echter bijna gelijk aan de gemeten massamediane doorsnede $d_{1/2}$, per definitie de deeltjesdoorsnede op de helft van de massaverdeling. Men moest dus verwachten dat in het experiment ruwweg de helft van het aerosol in de vaten zou uitzakken. Andere processen die de verspreiding belemmeren, zijn van ondergeschikte betekenis gebleken.

Op grond van de resultaten van experimenteel en theoretisch werk concludeert men dat het neerslaan van aerosolen op oppervlakken binnen het koelsysteem, het insluitsysteem, maar ook in de bijgebouwen, tot een grote beperking van de verspreiding van radioactief materiaal leidt.

Verspreiding van splijtstof

Ons eigen experimenteel onderzoek betreft de splijtstof, die, zoals hierboven

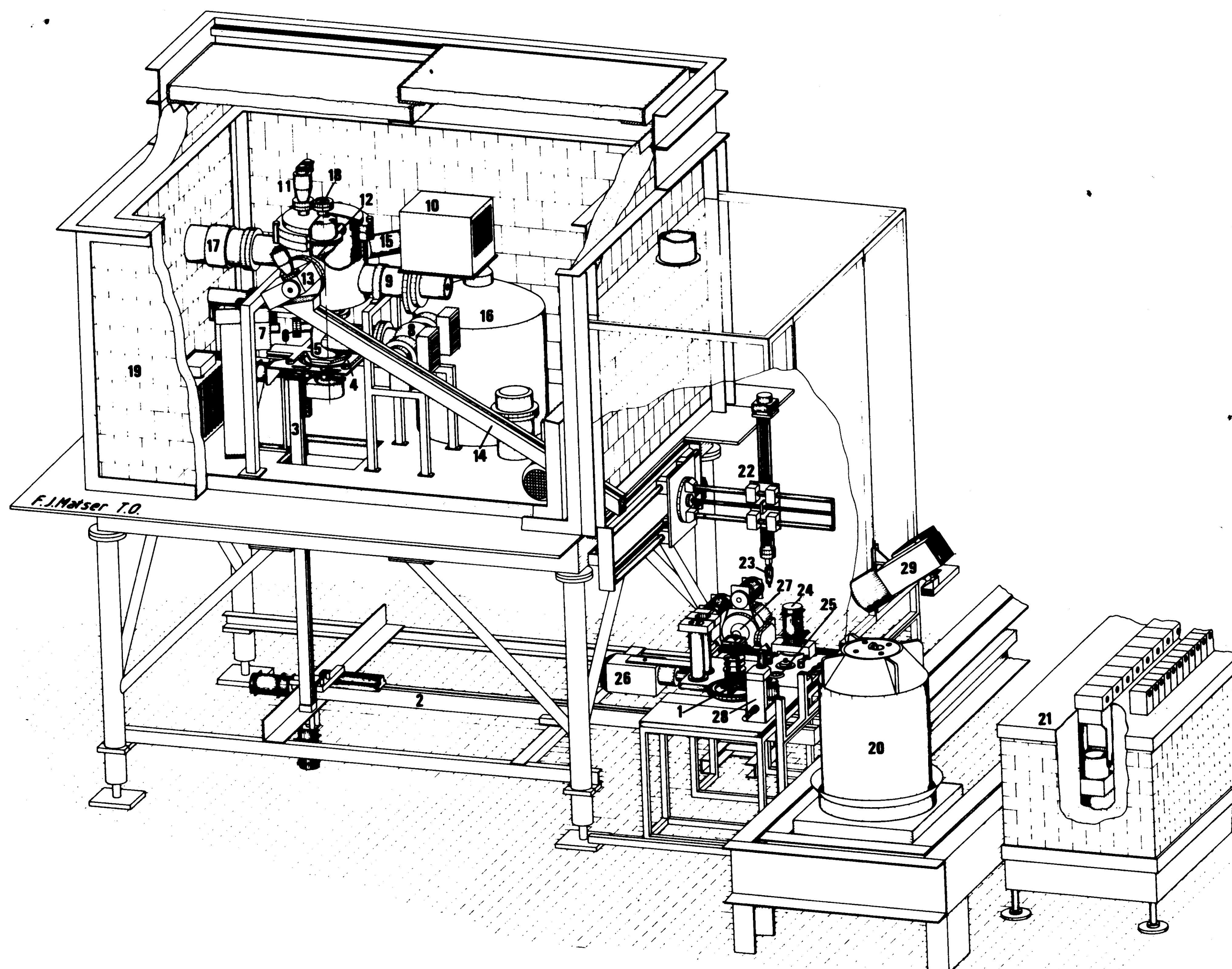


Fig. 1. De opstelling voor het brontermonderzoek van de KEMA. *1* Oven. *2* Horizontaal oventransport. *3* Verticaal oventransport. *4* Klem ovenflens. *5* Ovenrecipiënt. *6* Kijkglas. *7* Pyrometer. *8* Pomp. *9* Quadrupool. *10* Besturing quadrupool. *11* Chopper-motor. *12* Koude plaat. *13* Afvoer koude plaat. *14* Transport koude plaat. *15* Gammaspectrometer. *16* Dewar-vat. *17* Pomp. *18* Manometer. *19* Loodafscherming. *20* Capsule-container. *21* Opslag radioactief afval. *22* Manipulator. *23* Grijper. *24* Capsulezaag. *25* Microscoop monsterinspectie. *26* Microscoopcamera. *27* Tomograaf. *28* Verpakkingseenheid. *29* Overzichtscamera.

is opgemerkt, een belangrijke belemmering is voor de verspreiding van splijtingsprodukten. Meestal wordt een oxidische vorm van het uranium gebruikt (UO_2), een hard en zwart keramisch materiaal met een betrekkelijk ruim kristalrooster, zodat de splijtingsprodukten (op elk verspleten atoom gemiddeld twee andere, even grote of grotere atomen) interstitieel geplaatst kunnen worden. Ongeveer de helft van de splijtingsprodukten wordt echter chemisch gebonden, hetzij aan uranium hetzij aan zuurstof, en is dan substitutioneel geplaatst[4]. De activeringsenergie voor diffusie is ca. 2,5 eV voor de interstitiële en ca. 10 eV voor de substitutionele splijtingsprodukten. Normale bedrijfstemperaturen van de splijtstof komen overeen met een maximale thermische energie van 0,14 eV, zodat de diffusie van de splijtingsprodukten traag is. Feitelijk zijn ze opgesloten.

Het brontermexperiment van de KEMA

Het brontermexperiment van de KEMA zal duidelijkheid moeten geven over het ontwijkingstempo en de chemische vorm van splijtingsprodukten uit oververhitte splijtstof. In de BR Duitsland, de V.S. en Groot-Brittannië zijn of worden experimenten uitgevoerd met een vergelijkbare doelstelling.

Wij gebruiken bij ons onderzoek UO_2-bolletjes met een diameter variërend van 0,7 tot 2,2 mm en een verrijkingsgraad van 0,26% (verarmd), 8% of 20%. Voor de bestraling in de hoge-fluxreactor van het ECN te Petten kunnen neutronenflux en bestralingstijd gekozen worden, opdat de toestand van de splijtstof tijdens en na bestraling goed overeenkomt met splijtstof in een kernreactor. Nadien worden bij de KEMA verschillende manipulaties aan de capsule verricht om de sterk radioactieve monsters (γ-activiteit = 370 Giga Bq $\approx$ 10 Curie) veilig en onbeschadigd in een tomograaf te brengen. Hiermee wordt een driedimensionale concentratieverdeling van verschillende splijtingsprodukten binnen de UO_2-bol bepaald. Nadien wordt de bol in een hoge-temperatuuroven gebracht en kan de verhitting beginnen. Daarbij worden verschillende oppervlakken sterk radioactief besmet. Na afloop worden deze met speciale apparatuur verwijderd en veilig opgeborgen in een loden bunker. *Fig. 1* geeft een indruk van de meetopstelling.

Tomografie

De tomograaf bestaat uit een monsterhouder met spleetcollimator en gammadetector. Door gebruik te maken van een speciale wolfraam-koperlegering kon een compacte collimator gebouwd worden met een spleetbreedte van 50 μm. We zijn in staat de γ-activiteit van een 'schijfje' (= tomos) uit de bol te bepalen.

Fig. 2 geeft een voorbeeld van een gamma-'scan' over een bol. Een bol met een homogene concentratie geeft een parabolisch profiel. Kennelijk is geen der concentratieverdelingen homogeen. Om een echte driedimensionale verdeling te krijgen, moet men verschillende scans maken, waarbij telkens de bol- of de spleetpositie wordt veranderd. In de praktijk worden dertig scans gemaakt waarbij de stapgrootte gelijk is aan de spleetbreedte. Per nuclide vormen de meetresultaten, samen met de scancoördinaten, de invoer voor het reconstructieprogramma dat op een computer

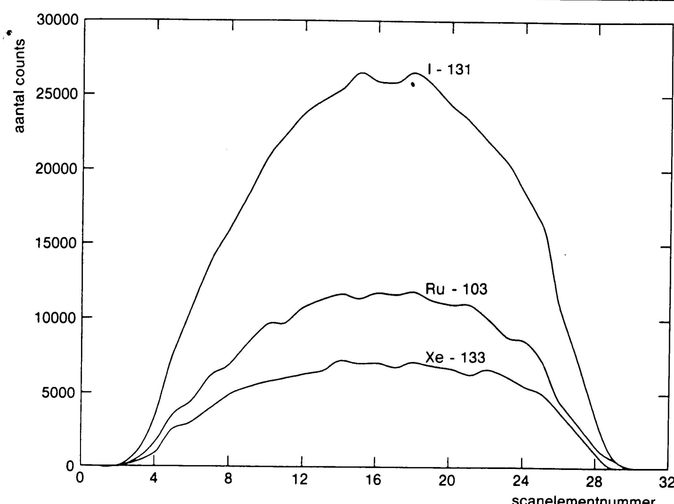


Fig. 2. Intensiteitsprofiel voor drie splijtingsprodukten over een UO_2-bol.

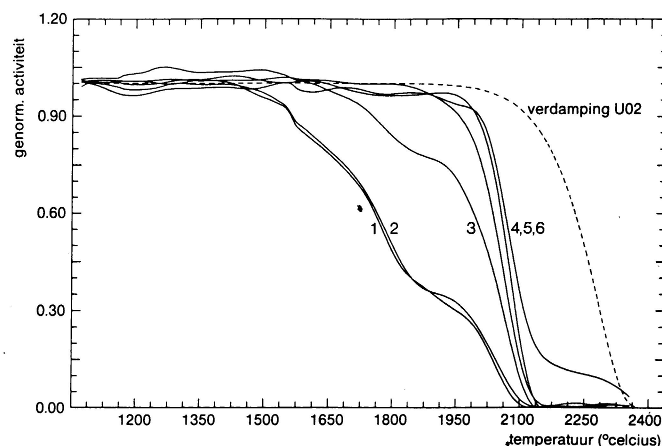


Fig. 3. Gamma-activiteit van een UO_2-bol bij geleidelijke verhoging (0,1 K/s) van de temperatuur. *1* Jodium-131; *2* Jodium-132; *3* Barium-140; *4* Lanthaan-140; *5* Zirconium-95; *6* Ruthenium-103. De streeplijn geeft de UO_2-verdamping weer, afgeleid uit een modelberekening.

geïnstalleerd is. De computer-uitvoer geeft ten slotte de concentratieverdeling in de bol. Deze geeft ons informatie over de fysische en chemische processen die zich hebben afgespeeld. Het reconstructieprogramma is getest met behulp van gesimuleerde metingen maar nog niet toegepast voor werkelijke metingen.

Het verhittingsexperiment

Het UO_2-bolletje bevindt zich tijdens verhitting in een wolfraamkroesje dat door een elektronenbombardement wordt verhit. Het gewenste temperatuurtraject kan vooraf worden ingesteld. De temperatuur wordt bepaald met een dubbellijns pyrometer (onzekerheid in de temperatuurbepaling: 50 °C). De tijdens verhitting uit het bolletje vrijkomende deeltjesbundel passeert een chopper en wordt geanalyseerd met een quadrupool-massaspectrometer. Fasegevoelige detectie verhoogt de gevoeligheid van dit meetsysteem, hetgeen gezien de geringe hoeveelheid van splijtingsprodukten in het monster noodzakelijk is. De bundel wordt vastgevroren op een met vloeibare stikstof gekoelde trefplaat. Met een gammadetector-pinhole-collimatorsysteem wordt tijdens de verhitting de activiteit van verschillende nucliden in het monster bepaald. Een minicomputer zorgt voor de temperatuurregeling, de besturing en de data-acquisitie.

Fig. 3 en *fig. 4* geven het resultaat van de gamma-activiteitsmetingen bij eén proef met een verhittingstempo van 0,1 K/s.

Fig. 3 laat zien dat de substitutioneel geplaatste elementen lanthaan (La), zirconium (Zr) en ruthenium (Ru) tot 1900 °C niet vrijkomen. Het snel afnemen van de activiteit boven 1900 °C is het gevolg van het verdampen van de UO_2-matrix. Dit blijkt o.a. uit een analyse van de uraniumlijnen in de massaspectra. Modelleren van deze verdamping geeft de gestippelde curve in fig. 3. In dit model wordt aangenomen dat de onbeweeglijke splijtingsprodukten homogeen over de UO_2-bol zijn verdeeld. De bol verdampt laag na laag, met een tempo dat beschreven wordt door de dampdruk van onbestraald, homogeen UO_2 bij de heersende temperatuur[5]. Bij het afschillen van de bol komen de splijtingsprodukten vrij. Bestraald UO_2 verdampt blijkbaar sneller. Dit wekt geen verbazing, gezien de afwijkende interne structuur met vele poriën en holten, die het verdampende oppervlak sterk vergroten. De elementen jodium (I) en barium (Ba) verdwijnen echter veel sneller, waarbij opvalt dat bij 1850 °C het tempo sterk afneemt. In experimenten met gesimuleerde splijtstof met niet-radioactieve splijtingsprodukten (zie [2]) is dit nog niet eerder opgevallen. Mogelijk is het een gevolg van na-sintering; de UO_2-kristallieten groeien aan en sluiten bestaande poriën. Bij hogere temperatuur neemt de mobiliteit sterker toe dan de groei van de kristallieten en stijgt het ontwijkingstempo weer[6].

Fig. 4 toont verder een goede overeenkomst voor jodium (I) met resultaten van andere experimenten tussen 1400 en 1800 °C. Daarbij werd UO_2 in een oxiderend milieu (b.v. stoom) verhit. Voor het element barium (Ba) betekent dit de vorming van de weinig vluchtige vorm BaO. Het door ons gemeten hoge ontsnappingstempo duidt erop dat Ba als element via de interstitiële ruimte uit de splijtstof beweegt. Verder valt op dat Ru niet geheel verdwijnt; het blijft, evenals in mindere mate Zr, achter in het wolfraamkroesje. Dit blijkt uit een gamma-analyse van het kroesje.

Bij de tot nu toe gedane verhittingsproeven van monsters met weinig versplijting

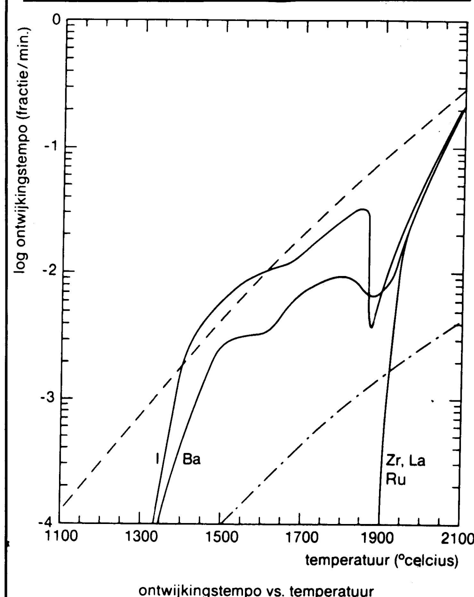


Fig. 4. Ontwijkingstempo van enige splijtingsprodukten als functie van de temperatuur. De onderbroken lijnen zijn ontleend aan het rapport NUREG-0772 (zie ook [2]); de streeplijn geldt voor jodium, de puntstreeplijn voor barium.

hebben wij nog geen splijtingsprodukten in het massaspectrum kunnen aantonen. De proeven zullen met sterker verspleteten splijtstof worden voortgezet.

Referenties

1. M. Bustraan, Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde **A49** (1983) 130.
2. R. Wilson (ed.), Rev. mod. Phys. **57-3** (1985) part II.
3. C.D. Andriesse, KEMA Scientific & Technical Reports **3** (1985) 131.
4. C.D. Andriesse, IAEA Symposium SM-281/6 (1986) 65.
5. R.W. Ohse, J. Chem. Phys. **44**-4 (1966) 1375.
6. D.R. Olander, Fundamental Aspects of Nuclear Reactor Fuel Elements, TID-26711-P1, Dept. of Energy, USA.

De toekomst van de kernenergie

In 1978 organiseerde het zgn. Vienna Centre een ronde-tafelconferentie over de maatschappelijke dimensies van het vreedzaam gebruik van kernenergie. In mijn bijdrage aan deze conferentie* formuleerde ik twee bedenkingen tegen het gebruik van kernenergie voor de produktie van elektriciteit:

- Zolang het verdrag tegen de verspreiding van kernwapens niet naar de letter en de geest wordt uitgevoerd, moet men afzien van het zogenaamd 'vreedzaam' gebruik.
- Er moet volstrekte duidelijkheid zijn dat het bevorderen van de nucleaire elektriciteit de burgerlijke vrijheden niet aantast.

In dit artikeltje wil ik op beide aspecten ingaan en de vraagpunten betreffende de veilige opslag van het kernafval en de problemen rond de technische veiligheid van reactoren overlaten aan anderen. Allereerst dus enige aandacht voor de koppeling tussen kernenergie en kernbewapening. Deze speelt zich af in verschillende onderdelen van de zgn. splijtstofkringloop, zoals ik kort zal toelichten. Bij de meeste reactors moet het uranium dat uit de ertsen is verkregen, worden verrijkt tot enkele procenten U-235. De verrijkingstechnologie kan in de meeste gevallen eveneens worden gebruikt om het U te verrijken tot de hoge concentratie die nodig is voor het maken van een U atoombom.

Het volgende gevoelige punt is de kernreactor zelf. Uit het uranium ontstaat o.a. plutonium. In opwerkingsfabrieken wordt het Pu chemisch gescheiden van uranium. Het resulterende Pu kan – eventueel na een isotopenscheiding – worden gebruikt voor de Pu atoombom. De meest practische methode is om een staaf U betrekkelijk kort in een werkende reactor te leggen, zodat er niet al te veel Pu-isotopen ontstaan. Hiervoor kan men zowel een kerncentrale als een research-reactor gebruiken.

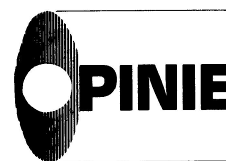
* Egbert Boeker, Nuclear energy and Nuclear weapons, a socio-political argument to abolish nuclear power. In: The Nuclear Debate, Occasional Papers, no. 1, European Coordination Centre for Research and Documentation in Social Sciences, 1981.

Er zijn dus drie gevoelige punten in het proces waarmee nucleaire elektriciteit wordt opgewekt: de U-scheiding, het bedrijven van de reactors en de opwerking van het verbruikte splijtbare materiaal. Het gegeven van de koppeling tussen kernenergie en wapens was aanleiding tot het sluiten van een verdrag tegen de verspreiding van kernwapens. Dit verdrag werd in 1970 van kracht. Het kent kernwapenstaten, zoals de VS en de Sovjet-Unie, en niet-kernwapenstaten, zoals Nederland. Splijtbaar materiaal en technologie worden door kernwapenstaten niet overgedragen aan niet-kernwapenstaten, tenzij voor vreedzame doeleinden. De controle hierop is opgedragen aan het Weense Atoombureau, de IAEA. In theorie zouden het verdrag en het afgesproken controlemechanisme er voor kunnen zorgen dat kernsplijting uitsluitend vreedzaam wordt benut. Er zijn echter drie problemen.

In de eerste plaats zijn er een aantal niet-ondertekenaars van het verdrag. Dat zijn dikwijls landen met dreigende of reële militaire conflicten. Een bekend voorbeeld is Israel, dat naar de mening van vrijwel alle experts over een aantal operationele kernwapens beschikt. Een ander voorbeeld is Pakistan, dat in 1984 aankondigde dat het zelfstandig de verrijkingstechnologie meester was geworden. Naar verluidt heeft de Pakistaner expert Khan dat in Nederland geleerd. Een potentiële Pakistaner bom kan de zelfbeheersing doorbreken van een andere niet-ondertekenaar, het buurland India; dit land heeft sinds zijn eerste proefexplosie in 1974 geen nieuwe wapens tot ontploffing gebracht.

Een tweede probleem is de vrees dat landen die het verdrag wel hebben ondertekend, zich niet aan de overeenkomst zullen houden. Een voorbeeld is Irak, dat er van wordt verdacht in de oorlog tegen Iran chemische wapens te gebruiken, zulks in strijd met het protocol van Genève uit 1925, dat het in 1931 tekende. Dan zou het, kan men denken, wellicht ook kernwapens in de strijd kunnen inzetten. De Israelies vermoedden dit kennelijk. Vandaar dat ze in 1981 de research-reactor te Osirak tijdens een luchtaanval vernietigden.

Ten slotte is er de voortdurende kernwapenwedloop tussen de bezitters van kernwapens, niet alleen op het gebied van aantallen maar met name op het gebied van kwaliteit. Het verdrag tegen de verspreiding van kernwapens wil zich niet neerleggen bij een verdeling van de wereld in de twee categorieën: kernwapenbezitters en anderen. Vandaar dat de ondertekenaars zich ertoe verplichtten te goeder trouw onderhandelingen te beginnen om een einde te maken aan de kernwapenwedloop (artikel VI). Nu is er sinds 1970 geen vooruitgang geboekt bij het afremmen van de kernwapenwedloop. De nucleaire grootmachten hebben op dit punt nog geen enkele wezenlijke overeenkomst gesloten.



Bovendien vertrouwen landen als Nederland nog steeds indirect op kernbewapening voor het handhaven van hun veiligheid. Het besluit om hier kruisraketten te plaatsen, is daarvan een voorbeeld. Vreedzame toepassing van kernenergie is naar mijn mening alleen mogelijk indien de kernwapenarsenalen worden verminderd en er uitzicht bestaat op hun vernietiging. Daarmee verliezen landen als India ook het argument om het verdrag tegen de verspreiding van kernwapens te ondertekenen. India wilde namelijk niet de status van een tweede-rangsmogendheid (zonder kernwapens) aanvaarden. Bovendien is dan een effectieve controle op het uitsluitend vreedzaam gebruik van nucleaire technologie mogelijk en kunnen de grotere landen niet langer bepaalde (militaire) installaties van controle uitsluiten.

Een wereld zonder kernwapens is sinds de gebeurtenissen van de laatste maanden niet geheel ondenkbaar. Het spreken over nulopties van middellange-afstandsraketten laat de ruim vierduizend nucleaire koppen voor tactisch gebruik aan NAVO-zijde weliswaar ongemoeid, maar ook daar zijn overeenkomsten denkbaar. Als op deze manier het kernwapen inderdaad zijn betekenis verliest en effectieve IAEA-controle mogelijk wordt, dan vervalt daarmee een sterk argument tegen het gebruik van kernenergie. Totdat het zover is, zal men echter de uiterste terughoudendheid moeten betrachten bij het aanbesteden van nieuwe kerncentrales.

Laten we nu de kwestie van de burgerlijke vrijheden nader beschouwen. In de

jaren '70 werd daarover druk gediscussieerd. Men kan stellen dat ook een vreedzaam gebruik van kernenergie talloze voorzorgsmaatregelen vraagt. De kennis om bommen te maken gaat immers niet verloren en men zal daarom de IAEA-waarborgen moeten handhaven en wellicht nog verbeteren. Dit om te voorkomen dat terroristische groepen of onverantwoordelijke politieke leiders de nucleaire weg kiezen om hun duistere doelen te bereiken. Men heeft daarvoor een inlichtingendienst nodig die in het verborgene werkt; veiligheidsclassificatie van werknemers; veiligheidsbeambten die diefstal moeten voorkomen en gestolen goed moeten opsporen, enz.

Maatregelen van deze aard komen op diverse plaatsen in onze samenleving voor. Ze hoeven als zodanig een maatschappij niet te ontregelen. Maar hier ligt wel een reden tot zorg. Als illustratie kan dienen dat het verslag van de ronde-tafelconferentie in Wenen, waar deze zaken werden besproken, in tegenstelling tot de bedoelingen *niet* in de reguliere publikatiereeks van het Centrum werd verspreid. Er waren te veel banden met internationale organisaties in het Weense circuit die zich op een ondubbelzinnig pro-kernenergiestandpunt hadden vastgelegd. Bedenkingen werden niet in dank afgenomen. Pas na drie jaar werd er een serie 'Occasional papers' gestart, speciaal met het doel om publikatie mogelijk te maken. Misschien is er toch wel iets waar van het verhaal dat kernenergie op gespannen voet staat met democratie en vrijheid van meningsuiting.

E. Boeker

Prof. dr. E. Boeker, hoogleraar in de theoretische natuurkunde aan de Vrije Universiteit te Amsterdam, is voorzitter van het Interfacultair Samenwerkingsverband Vredesvraagstukken van de VU. Als lid van de Pugwash-werkgroep 'Conventionele bewapening' neemt prof. Boeker deel aan wetenschappelijke Oost-West-besprekingen.

Nucleaire risicostudies

J.E. Speelman en A.D. Poley

In de praktijk van het leven is niets zonder risico. De risico's van b.v. het wegverkeer zijn relatief eenvoudig en betrouwbaar te kwantificeren, omdat er voldoende praktijkgegevens over verkeersongevallen voorhanden zijn. Bij energie-opwekking met kerncentrales gaat het echter om veel kleinere kansen op ongevallen – met potentieel veel grotere gevolgen – en is er van 'statistiek' nauwelijks sprake. Kansen op ongevallen en de gevolgen daarvan moeten daarom met behulp van modellen worden berekend (geschat). Modelstudies zijn onontbeerlijk wanneer men de voor- en nadelen van kernenergie wil kunnen afwegen. Natuurlijk wordt er lering getrokken uit de door veiligheidsstudies blootgelegde zwakke punten van bepaalde reactorontwerpen. Deze worden bij bestaande centrales zo mogelijk verbeterd en kunnen bij het ontwerp van nieuwe centrales worden voorkomen.

Het verrichten van veiligheids- en risicostudies is uitgegroeid tot een apart vakgebied, met een eigen jargon. In dit artikel worden – met zo min mogelijk jargon – enkele belangrijke aspecten van dit soort studies belicht. 'Risico' is een beladen begrip. De modellering van risicobeleving is in vakkringen een centraal discussiepunt. In de volksmond is het begrip risico veelal synoniem met 'gevolgen'. Daarom zal 'risico' in dit artikel in deze zin worden gebruikt. Het volgt dan uit de context of deze risico's van materiële of gezondheidsaard zijn, dan wel of risico's in het algemeen bedoeld zijn.

Inleiding

In het artikel van Hoogenboom (dit nr. blz. 49) is uitgelegd dat de produktie van vervalwarmte direct na het uitschakelen van een reactor omstreeks 7% van het thermische vermogen bedraagt. Na drie uur is dit nog ongeveer 1% of wel, bij volbedrijf, ca. 30 MW in het geval van een 1000 MWe-reactor ($\approx$ 3000 MWth). Deze 30 MW is van dezelfde orde van grootte als het thermisch vermogen van conventionele centrales zoals die in de jaren '50 werden gebouwd. Het probleem van de vervalwarmteproduktie bij energieopwekking met nucleaire centrales is dan ook de grondoorzaak van eventueel optredende vervolgproblemen.

Als de vervalwarmte niet wordt afgevoerd, zal de kern uiteindelijk smelten. De radioactieve inventaris is dan niet langer opgesloten. Om te allen tijde de vervalwarmte te kunnen afvoeren, zijn kerncentrales uitgerust met noodkoelsystemen. Deze worden zo ontworpen dat ze onder alle mogelijke condities de kern kunnen koelen. Als aanvullende maatregel wordt de reactor veelal omsloten door een betonnen en/of stalen gebouw, waaraan strenge lekdichtheidseisen worden gesteld. Dit gebouw moet zodanig zijn ontworpen dat inwendige en uitwendige belastingen kunnen worden weerstaan, zoals de impuls van een neerstortend vliegtuig, een gaswolkexplosie of een aardbeving.

Ondanks deze voorzieningen kan nooit met absolute zekerheid worden uitgesloten dat, ten gevolge van zeer abnormale omstandigheden, de kern toch smelt en het geheel van insluitconstructies ergens faalt en radioactief materiaal naar de omgeving ontsnapt. Om dit risico te kunnen schatten, worden risicostudies uitgevoerd. Men analyseert de gevolgen van lozingen en berekent de kans dat een lozing optreedt. Zo'n risicostudie wordt doorgaans in drie onderdelen uitgevoerd, men spreekt in dit verband van 'niveaus'.

In niveau 1 wordt geanalyseerd wat er allemaal fout moet gaan voordat de kern niet meer kan worden gekoeld. Daarbij gaat het niet alleen om falende onderdelen, maar ook om mogelijke menselijke fouten. Bij de ongevallen te Harrisburg en Tsjernobyl ontstonden situaties die (mede) het gevolg waren van menselijke fouten. Het bedieningspersoneel begreep de optredende processen niet, kon die voor een deel ook niet begrijpen, door gebrek aan relevante informatie of tekortkomingen in zijn opleiding.
Voor moderne reactorontwerpen is onlangs bij het ECN aangetoond dat de kans op kernsmelten en falen van het reactorvat in de orde van 10^{-5} per reactorjaar ligt.

In niveau 2 worden de processen bestudeerd die binnen de reactor-insluiting optreden na falen van het reactorvat. Er wordt geanalyseerd welke belastingen



Ir. J.E. Speelman (1930) studeerde elektrotechniek aan de Technische Universiteit Delft. In 1962 trad hij in dienst van het ECN, alwaar hij hoofd is van de sectie Thermohydraulica en Splijtstofelementen. In die functie is hij onder meer verantwoordelijk voor het niet-experimentele veiligheidsonderzoek dat bij ECN plaatsvindt.



Ir. A.D. Poley (31) studeerde toegepaste wiskunde aan de TU Eindhoven. In de periode 1982-1986 was hij werkzaam aan de Universiteit Twente op het gebied van de stochastische mathematische fysica. Eind 1986 trad hij in dienst bij ECN, alwaar hij zich onder meer bezighoudt met consequentiemodellering van radioactieve lozingen.

op de insluitconstructie kunnen ontstaan en of de constructie ten gevolge daarvan zal kunnen bezwijken. Wanneer dit in principe mogelijk is, dan wordt het moment berekend waarop en op welke wijze dit gebeurt. Voorts wordt in niveau 2 geanalyseerd welk deel van de reactorinhoud uit de kern kan ontsnappen, hoe transport en depositie van radionucliden binnen de insluitconstructie verlopen en wat dan uiteindelijk de hoeveelheid aan radioactieve stoffen is die uit de insluiting kan ontsnappen, de zgn. bronterm. Uit deze analyses volgen ten slotte berekende kansen op bepaalde brontermen.
De resultaten van onlangs bij ECN uitgevoerde berekeningen wijzen op een vervolgkans in de orde van 10^{-2} à 10^{-3} op falen van de insluiting als eerst het reactorvat het heeft begeven.

Gegeven een bronterm wordt in niveau 3 de verspreiding van de radioactieve stoffen bepaald buiten het reactorgebouw. Deze verspreiding zal afhankelijk zijn van de heersende weersgesteldheid. Voor de bepaling van de gevolgen voor de volksgezondheid worden de diverse wijzen van blootstelling geanalyseerd: directe blootstelling aan straling van de overtrekkende radioactieve wolk of van gedeponeerd stof of wel inwendige bestraling door nucliden die zijn geïnhaleerd of zijn geconsumeerd.

In 1975 werd de eerste risicostudie gepubliceerd, de Reactor Safety Study (RSS)[1], bij velen beter bekend als de studie-Rasmussen. Lange tijd is deze studie maatgevend geweest voor de beoordeling van de veiligheid van kerncentrales. Behalve voor de bepaling van de potentiële gevolgen van kernongevallen is deze studie gebruikt om de veiligheid van het bedrijven van kerncentrales te vergroten. Het scenario van een prompt-kritieke vermogensexcursie – zoals zich voordeed in Tsjernobyl – was niet voorzien in RSS, omdat de daarin beschouwde, met (licht) water gekoelde en gemodereerde reactoren zoveel intrinsieke fysische terugkoppelmechanismen bevatten, dat zo'n vermogensexcursie niet kan optreden. Wel was daar een bronterm van soortgelijke grootte beschouwd. Een resultaat van RSS is opgenomen in de figuur in nevenstaand kader, waarin onder meer voor honderd in Amerika opgestelde reactoren is uitgezet de kans per jaar dat het aantal slachtoffers groter is dan de ondervermelde waarde.

De gevolgen van gebeurtenissen die in niveau 1 worden bestudeerd, zijn slechts van economische aard: reparatie of ontmanteling en vervanging van kerncentrales. Daarom worden in dit artikel alleen de beide andere niveaus uitgewerkt. Eerst wordt voor niveau 2 een aantal scenario's kwalitatief behandeld, waarna voor niveau 3 de externe gevolgen worden besproken.

Scenario's die tot een lozing van radioactief materiaal leiden

Omdat een eventueel in Nederland te bouwen kerncentrale waarschijnlijk zal zijn gebaseerd op een lichtwaterreactor, zullen we ons wat de faalscenario's betreft in dit artikel beperken tot deze categorie reactoren. De reactorinsluiting vormt een barrière welke tot doel heeft te voorkomen dat radioactief materiaal ontsnapt naar de omgeving. Vijf scenario's die tot niet te verwaarlozen emissies van radioactieve stoffen leiden, zullen worden uitgediept:

- Bezwijken van de reactorinsluiting door overdruk en te hoge temperaturen.
- Penetratie van de reactorinsluiting door een projectiel.
- Doorsmelten van de bodem van het reactorgebouw.
- Lekken van afdichtingen en afsluiters.
- 'Kortsluit'-scenario.

Bij ieder scenario zal tevens worden aangegeven door welke ontwerpmaatregelen de kans van optreden kan worden verminderd.

Bezwijken van de reactorinsluiting door overdruk en te hoge temperaturen

Wanneer via een in niveau 1 te bestuderen scenario daadwerkelijk kernsmelten optreedt, zal dit ook leiden tot een grote warmteafgifte aan de reactorinsluiting. Daardoor zal allereerst het water uit het primaire koelsysteem verdampen en als stoom binnen de reactorinsluiting worden geblazen. De temperatuur en de druk binnen de reactorinsluiting zullen steeds verder stijgen. Dit wordt nog versterkt doordat door oxidatie van het bekledingsmateriaal van de splijtstof waterstof wordt gevormd. Deze kan vervolgens explosief verbranden, zodat de insluiting een drukpiek krijgt te verwerken, die tot bezwijken kan leiden. Een andere mogelijkheid waardoor drukpieken kunnen worden veroorzaakt, is het fenomeen van 'direct heating'. Na doorsmelten van het reactorvat kan heet kernmateriaal onder hoge druk het reactorgebouw ingeblazen worden. De zeer hete metaaldeeltjes kunnen tijdens hun verspreiding in het reactorgebouw met stoom of zuurstof reageren en zo een extra energietoevoer leveren. Falen van de insluiting in deze fase zou een bronterm betekenen waarbij 10 tot 50% van de vluchtige verbindingen zou ontsnappen.

Momenteel groeit het inzicht dat het beter is om vroegtijdig op gecontroleerde wijze een deel van de radioactieve stoffen te lozen dan te wachten totdat op ongecontroleerde wijze een veel grotere lozing plaatsvindt. In de meeste landen, vooral in Europa, zullen de reactoren daarom worden voorzien van afblaaskanalen waarin filters worden geplaatst welke een belangrijk deel van het radioactieve stof (aerosolen) wegvangen. Op deze manier lozen leidt tot een bronterm in de orde van 0,1% van de kerninventaris. Het fenomeen van direct heating is eveneens te beteugelen met ontwerpmaatregelen.

Penetraties door een projectiel

Een reactorgebouw wordt zo ontworpen dat het bepaalde uitwendige en inwendige projectielen kan weerstaan. Zo is in sommige landen (waaronder Nederland) voorgeschreven dat de reactorinsluiting zelfs bestand moet zijn tegen een daarop neerstortend vliegtuig. Ook voor belastingen van binnen uit moet de reactorinsluiting aan bepaalde voorschriften voldoen. Het belangrijkste mechanisme dat tot het lanceren van inwendige projectielen kan leiden, is de stoomexplosie. Deze treedt b.v. op wanneer gesmolten metaal in water valt. Rond de metaaldeeltjes zal zich dan een

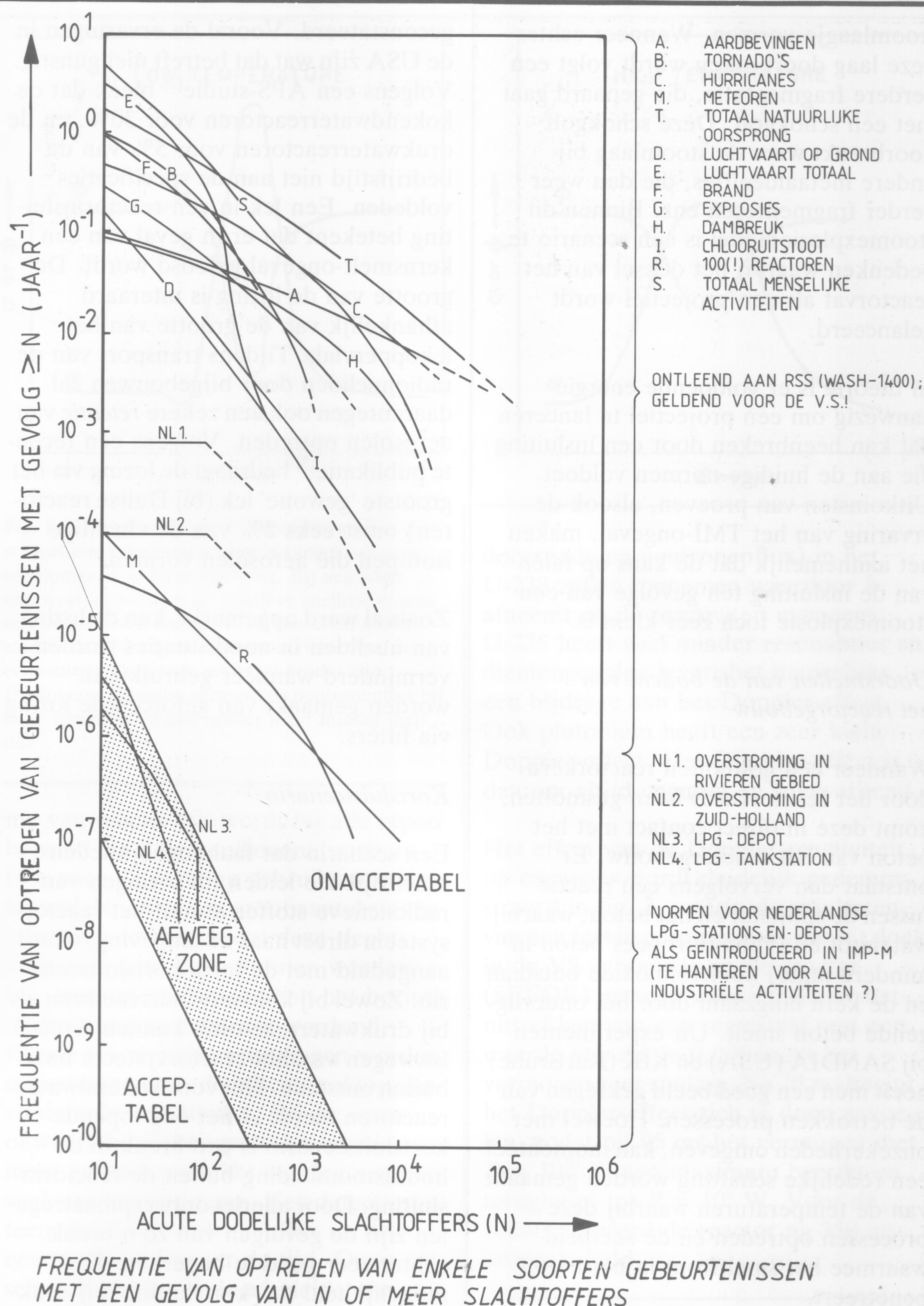
Norm voor de aanvaardbaarheid van risico's

In het recente verleden is er een levendige discussie geweest over de aanvaardbaarheid van de risico's van een LPG-pompstation voor de omgeving. Als antwoord hierop heeft het ministerie VROM een norm geproduceerd[a]. Voor iedere lokatie moet thans een veiligheidsrapport worden gemaakt waarin de kans op ongevallen van verschillende ernst wordt berekend. Een dergelijke norm zou ook kunnen worden gebruikt voor de beoordeling van de aanvaardbaarheid van de risico's van een kerncentrale. Hiermee zou een consistent overheidsbeleid ontstaan.

In de risico-analyse beschouwt men doorgaans CCDF-krommen (Complementary Cumulative Frequence Distributions). Langs de x-as wordt daarbij het gevolg van een gebeurtenis uitgezet (b.v. het aantal directe dodelijke slachtoffers N), langs de y-as staat dan de (cumulatieve) kans dat het gevolg van een gebeurtenis groter of gelijk aan de bijbehorende x-waarde is. De reden dat men niet het complement hiervan (de kans op minder dan N slachtoffers) uitzet, is van psychologische aard: een miniem verschil ten opzichte van kans 1 wordt geheel anders ervaren dan hetzelfde verschil ten opzichte van kans 0.

De norm die het ministerie heeft opgesteld heeft de volgende vorm. De kans dat een ongeval met ten minste tien doden kan voorkomen, kan aanvaardbaar zijn wanneer deze kleiner is dan 10^{-7} per jaar. Als marge is aangegeven dat bij afweging van andere factoren eventueel een kans van maximaal 10^{-5} per jaar nog aanvaardbaar kan zijn. Om te verdisconteren dat volgens de menselijke beleving de ernst van een ongeval sterker dan lineair toeneemt met de grootte van de gevolgen, heeft het ministerie gekozen voor een kwadratisch verband.

Uitgaande van beide eerder genoemde gevolgkansen, levert dit in de bijgaande dubbel-logarithmische grafiek een tweetal rechte lijnen: hierin is vertikaal uitgezet de kans dat bij een ongeval minstens het horizontaal aangegeven aantal doden zal vallen. Door beide lijnen wordt de grafiek in drie gebieden verdeeld: linksonder en rechtsboven de gebieden waar de gevolgen volgens de norm respectievelijk onvoorwaardelijk wel en onvoorwaardelijk niet aanvaardbaar zijn, terwijl het tussengebied de 'beleidsruimte' of 'afweegzone' aangeeft. Volgens de gepresenteerde norm is een lokatie met een ongevalscenario waarvan de risico-kromme door het rechter bovendeel van de grafiek loopt, onaanvaardbaar.



FREQUENTIE VAN OPTREDEN VAN ENKELE SOORTEN GEBEURTENISSEN MET EEN GEVOLG VAN N OF MEER SLACHTOFFERS

In de grafiek is o.a. de risico-kromme opgenomen voor ongevallen met totaal 100 Amerikaanse kerncentrales[b]. Ook zijn de krommen ingetekend van een aantal ongevallen en rampen die betrekking hebben op de Nederlandse situatie.

Zonder in verband met de normstelling in te gaan op risicobeleving in het algemeen, kan gezegd worden dat de beschreven norm een zwak punt heeft. Men zou namelijk kunnen denken dat voor ieder ongevalsscenario afzonderlijk aan de norm moet worden voldaan. Dit heeft dan het voordeel dat het probleem van de inherente onvolledigheid van het totaal van beschouwde ongevalsscenario's in een veiligheidsstudie wordt vermeden. Door echter een ongevalsscenario in voldoende mate te detailleren en daarmee te scheiden in meerdere scenario's, kan altijd aan de gehanteerde norm worden voldaan. De gepresenteerde norm heeft dus alleen zin wanneer deze wordt betrokken op het totale pakket ongevalsscenario's: de cumulatieve (berekende!) kans op bepaalde gevolgen moet aan de norm voldoen. Hierbij moet de overheid dan wel expliciet de methode aangeven waarmee het totale pakket te beschouwen scenario's bepaald moet worden.

a. Ministerie VROM, Integrale Nota LPG, Tweede-Kamer-zitting 1983/1984, 18233, Staatsuitgeverij, 's-Gravenhage, 1984.
b. N.C. Rasmussen, Reactor Safety Study, WASH-1400, NUREG 75/014, 1975.

stoomlaagje vormen. Wanneer echter deze laag doorbroken wordt volgt een verdere fragmentatie, die gepaard gaat met een schokgolf. Deze schokgolf doorbreekt weer de stoomlaag bij andere metaaldeeltjes, die dan weer verder fragmenteren enz. Binnen dit stoomexplosiemodel is een scenario te bedenken waarbij het deksel van het reactorvat als een projectiel wordt gelanceerd.

In theorie is er voldoende energie aanwezig om een projectiel te lanceren dat kan heenbreken door een insluiting die aan de huidige normen voldoet. Uitkomsten van proeven, alsook de ervaring van het TMI-ongeval, maken het aannemelijk dat de kans op falen van de insluiting ten gevolge van een stoomexplosie toch zeer klein is.

Doorsmelten van de bodem van het reactorgebouw

Wanneer een gesmolten reactorkern door het reactorvat is heen gesmolten, komt deze in direct contact met het beton van het reactorgebouw. Er ontstaat dan vervolgens een reactie tussen de splijtstof en het beton, waarbij waterstof en (voor Europees beton in mindere mate) koolstofdioxide ontstaan en de kern langzaam door het onderliggende beton smelt. Uit experimenten bij SANDIA (USA) en KfK (Karlsruhe) heeft men een goed beeld gekregen van de betrokken processen. Hoewel met onzekerheden omgeven, kan momenteel een redelijke schatting worden gemaakt van de temperaturen waarbij deze processen optreden en de snelheid waarmee het smeltfront in het beton penetreert.

Men is tegenwoordig van mening dat de splijtstof/betoninteractie moet worden voorkomen. Daarom overweegt men de bodem van het reactorgebouw permanent onder water te zetten. De veronderstelling daarbij is, dat de splijtstof in grove deeltjes zal fragmenteren, welke samen een koelbaar bed zullen vormen. Experimenten om dit idee te verifiëren, moeten echter nog worden uitgevoerd. Overigens zullen bij doorsmelten van de bodemplaat van het reactorgebouw nauwelijks lozingen naar de atmosfeer kunnen optreden. Wel zal het onderliggende grondwater besmet worden. Door het treffen van maatregelen achteraf, als het slaan van een damwand, kan de verspreiding in het grondwater effectief worden tegengegaan.

Lekken van afdichtingen en afsluiters

Bij kerncentrales worden periodiek lekdichtheidstests uitgevoerd, waarbij ook daadwerkelijk lekken worden geconstateerd. Vooral de ervaringen in de USA zijn wat dat betreft niet gunstig. Volgens een APS-studie[2] bleek dat de kokendwaterreactoren voor 30%, en de drukwaterreactoren voor 5% van de bedrijfstijd niet aan de specificaties voldeden. Een lek in een reactorinsluiting betekent dat er in geval van een kernsmelt-ongeval geloosd wordt. De grootte van de lozing is uiteraard afhankelijk van de grootte van het lekoppervlak. Tijdens transport van de radionucliden door bijgebouwen zal daarentegen ook een zekere *retentie* van aerosolen optreden. Volgens een recente publikatie[3] bedraagt de lozing via het grootste 'gewone' lek (bij Duitse reactoren) omstreeks 2% van de vluchtige isotopen die aerosolen vormen.

Zoals al werd opgemerkt, kan de lozing van nucliden in noodsituaties worden verminderd wanneer gebruik kan worden gemaakt van geforceerde lozing via filters.

Kortsluitscenario

Een scenario dat faalmogelijkheden beschrijft die leiden tot lozingen van radioactieve stoffen vanuit het reactorsysteem direct naar de omgeving, wordt aangeduid met de term kortsluitscenario. Zowel bij kokendwaterreactoren als bij drukwaterreactoren kunnen directe lekwegen van het reactorsysteem naar buiten ontstaan. Het voor kokendwaterreactoren meest in het oog lopende kortsluitscenario is een breuk in de hoofdstoomleiding buiten de reactorinsluiting. Door allerlei ontwerpmaatregelen zijn de gevolgen van zo'n breuk echter zeer goed te beperken. Een mogelijkheid tot 'kortsluiting' bij drukwaterreactoren vormen de stoomgeneratorpijpen. De lekweg gaat in dit geval via de veiligheidskleppen van het turbinesysteem. Deze zouden, na veelvuldig te hebben moeten afblazen, in geopende toestand kunnen falen.

De gevolgen van breuk van een stoomgeneratorpijp kunnen door het bedieningspersoneel in hoge mate worden beïnvloed. Daarom is het van belang dat voor dit soort ongevallen procedures zijn vastgelegd waarbij rekening wordt gehouden met alle mogelijkheden van beschikbaar en niet beschikbaar zijn van systemen. Omdat accident management in dit scenario zo dominant is, is het moeilijk een kans van optreden van aanzienlijke lozingen ten gevolge van een kortsluitscenario aan te geven.

Volledigheid

De vijf beschreven faalscenario's worden als de belangrijkste scenario's beschouwd die tot gröte lozingen van radioactieve stoffen kunnen leiden. De aangegeven ontwerpmaatregelen die elk van de bovengenoemde scenario's op een bepaald punt doen afbreken, beogen echter niet te suggereren dat daarmee alle scenario's uit de categorie grote lozingen onmogelijk zijn geworden. Ieder nieuw (of veranderd) reactorontwerp zal weer minutieus bekeken moeten worden op zijn zwakke punten. Volledigheid kan in een veiligheidsstudie echter slechts worden benaderd!

Consequentie-analyse

Wanneer door falen van de insluitconstructie of door gecontroleerde lozing radionucliden buiten een kerncentrale terechtkomen, zullen deze zich in het milieu gaan verspreiden. In de wijze van verspreiding verschillen radionucliden niet van stabiele isotopen. Wel vervallen radioisotopen tijdens de verspreiding naar andere isotopen. De directe gevolgen op lange termijn zijn sterk afhankelijk van de samenstelling, grootte en duur van de radioactieve lozing. Ook zijn de consequenties van een lozing in de atmosfeer, op het oppervlaktewater of in de bodem geheel verschillend.

Naast verspreiding in de genoemde milieus zal er ook uitwisseling van nucliden tussen de verschillende milieus plaatsvinden. Zo zullen na een atmosferische lozing nucliden door depositie in het grond- of het oppervlaktewater terechtkomen. Daarbij moet nog bedacht worden dat deze beide milieus in open verbinding met elkaar staan. Vervolgens kunnen levende organismen nucliden opnemen en doorgeven in de voedselketens. In *fig. 1* is een schematisch overzicht gegeven van de belangrijkste transportroutes van radionucliden van bron naar mens.

Van alle lozingswegen heeft de atmosferische de meest directe gevolgen. Daarnaast is ook de verspreiding in de atmosfeer nauwelijks technisch te beïnvloeden. Daarom ook zijn van deze lozingswijze de gevolgen het meest bestudeerd maar ook het best te modelleren. De beschouwing van deelmodellen voor consequentie-analyse is hier dan ook beperkt tot processen die een rol spelen na een lozing van radionucliden in de atmosfeer.

Verspreiding in de atmosfeer en depositie

Verspreiding van nucliden in de atmosfeer is te scheiden in transport met de lokale gemiddelde luchtsnelheid (windveld) en dispersie door de lokale luchtturbulentie. Fundamentele atmosferische verspreidingsmodellen geven dan ook een benaderende oplossing van de vergelijkingen van Navier-Stokes die

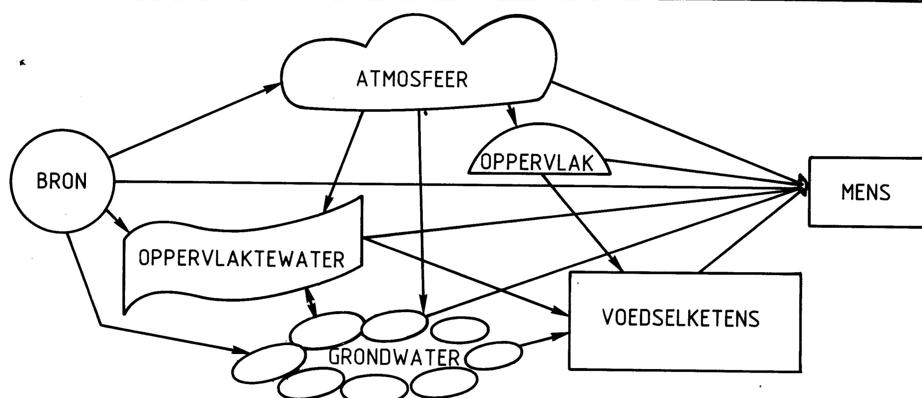


FIG. 1

het windveld beschrijven, waarna dispersie in het berekende windveld met een (deeltjes-)dispersiemodel wordt gemodelleerd. De prijs voor de algemene toepasbaarheid van bovenstaande modellen is de grote hoeveelheid computertijd die voor verspreidingsberekeningen benodigd is. Voor min of meer vlak terrein (zoals in Nederland) kunnen ook eenvoudiger modellen worden gebruikt.

Bij een meer fenomenologische aanpak van de atmosferische verspreiding maakt men gebruik van de 'structuren' die men in atmosferische bewegingen kan onderscheiden, de 'eddies'. Een eddy is een vaag afgebakende luchtmassa waarbinnen de luchtsnelheden sterk gecorreleerd zijn. Een hoeveelheid geloosd materiaal wordt meegenomen door een langskomend lucht-'pakket'. Binnen de eddy vindt dan nog, als gevolg van de lokale turbulentie, een diffusie-achtige verspreiding plaats (eddy diffusity).

De ernstigste gevolgen in termen van slachtoffers en directe economische gevolgen treden op in het gebied met hoge doses, dus tamelijk dicht bij het lozingspunt. Korte afstanden corresponderen met korte transporttijden, zodat slechts de kleinste eddies invloed hebben op de verspreiding in dit gebied. Uitgaande van een vaste windsnelheid en windrichting levert de diffusieachtige verspreiding een 'Gaussisch' concentratieprofiel, daarom wordt het model dat op bovenstaande beschouwing is gebaseerd het Gauss-pluimmodel genoemd. Dit model wordt veel toegepast in risico-analyses van radioactieve lozingen[1,4,5]. Omdat de windrichting vast is ondersteld, kan de tijdsintegratie expliciet worden uitgevoerd. De over de tijd geïntegreerde nuclideconcentratie wordt berekend volgens:

$$C(x,y,z;h) = \frac{Q(x)}{2\pi u\sigma_y\sigma_z}\exp\left[\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right]\left\{\exp\left[\frac{-(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[\frac{-(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right]\right\} \quad (1)$$

Hierin zijn x, y en z de afstanden (m) langs de coördinaatassen (de x-as valt samen met de gemiddelde windrichting); $Q(x)$ de totale emissie van de bron (Bq), gecorrigeerd voor verval en ontstaan van nucliden in de transporttijd; u de gemiddelde windsnelheid in m/s op hoogte h; σ_y, σ_z de standaarddeviatie (m) van de gemiddelde concentratieverdeling in resp. de y- en de z-richting, een functie van x.
Afhankelijk van de weersomstandigheden zijn de uitkomsten van het Gauss-pluimmodel betrouwbaar tot op afstanden van 30 tot 100 km.

Uiteraard is dit model sterk gestileerd. Zo kan het niet worden toegepast ter beschrijving van de nuclidenverspreiding na het ongeval te Tsjernobyl, omdat daar sprake was van een langdurige lozing. In die periode was de windrichting allerminst vast. Voor de directe omgeving van het reactorgebouw zou die mogelijkerwijs wel kunnen worden beschreven met een variant van het Gauss-pluimmodel, het puff-model. In dat model wordt een langdurige lozing samengesteld uit een aantal afzonderlijke puff's, waarvan de verspreiding op de eerder genoemde wijze wordt berekend en de uitkomsten gesommeerd. Een voordeel van deze variant is dat nu wèl rekening kan worden gehouden met wisselende weersomstandigheden en windrichtingen. Een ander voordeel is dat ook een tijdsafhankelijke nuclidenuitstoot kan worden meegenomen. De benodigde meetgegevens om de bij het Tsjernobyl-ongeval opgetreden nuclidenverspreiding te gebruiken als verificatie van het Gauss-pluimmodel, ontbreken echter.

Het vrijgekomen radioactieve materiaal zal zich niet alleen verspreiden in de atmosfeer maar ook neerslaan op de bodem of het oppervlaktewater. Er wordt onderscheid gemaakt tussen droge en natte depositie. Onder droge depositie wordt verstaan het neerslaan van materiaal onder invloed van de valsnelheid van deeltjes. Ook fysische en chemische adsorptie aan het oppervlak van grond, gebouwen e.d. wordt in deze term verdisconteerd. Natte depositie omvat uitwassen (vangst in regendruppels) en uitregenen (wanneer de deeltjes optreden als condensatiekernen).

Transport door de voedselketens

Radionucliden kunnen via de voedselketens naar de mens worden getransporteerd. Men onderscheidt een tweetal voedselketens: de terrestrische en de aquatische voedselketen in resp. het 'droge' en het 'natte' milieu.

Het terrestrische ecosysteem wordt onderverdeeld in vier componenten: de bodem, de planten, de dieren en de mens. Het transport van activiteit van bodem naar plant door wortelopname hangt sterk af van de aard van de nuclide en de plant. Dieren kunnen radionucliden opnemen via voedsel, maar ook rechtstreeks via besmet drinkwater of gronddeeltjes. Voor incidentele besmettingen moeten dynamische modellen worden gebruikt die de opname, het metabolisme en de uitscheiding van de radionucliden beschrijven als functie van de tijd. Bij incidentele lozingen is ook het seizoen van groot belang in verband met het al of niet op stal staan van vee of op het land staan van te oogsten produkten.

Ook het aquatische ecosysteem wordt verdeeld in een aantal fysische en biologische componenten. De overdracht van nucliden van het water naar de daarin levende organismen wordt in dit ecosysteem beschreven met bioaccumulatiefactoren: de nuclideconcentratie in een waterorganisme gedeeld door de waterconcentratie. Omgevingsfactoren hebben vaak een grote invloed[6].

Consequenties: dosis en effect

Voor wat betreft de gevolgen van straling voor de mens moet onderscheid worden gemaakt tussen uitwendig en inwendig ontvangen straling. Stralingsschade buiten de onmiddellijke omgeving van de centrale wordt vooral veroorzaakt door γ-straling. Het effect van straling is afhankelijk van de energie en de soort straling. Om de gevolgen van verschillende soorten straling en energieën op één noemer te brengen, is het zgn. dosisequivalent gedefinieerd (kortweg aangeduid met 'dosis'), met als eenheid de sievert (Sv).

Naar het effect van stralingsdoses is veel onderzoek gedaan, al beperken deze zich begrijpelijkerwijs veelal tot dier-

proeven. De resultaten hiervan worden uitgedrukt in de zgn. dosis-effectrelaties. Er wordt onderscheid gemaakt tussen stochastische en niet-stochastische stralingsschade.

Niet-stochastische stralingsschade is de schade aan het lichaam die veelal binnen enkele dagen of weken blijkt. Deze kan zich uiten in misselijkheid, diarree en bloedarmoede en kan bij hoge doses dodelijk zijn. Karakteristiek voor dit soort stralingsschade is het bestaan van een drempeldosis waaronder de kans op sterfte nihil is. Daarboven neemt de kans op dodelijke afloop toe met de dosis. Het orgaan dat het gevoeligst is voor niet-stochastische stralingsschade is het beenmerg. Hiervoor ligt de drempeldosis ongeveer bij 2,5 Sv, terwijl een dosis van 4,5 Sv voor vrijwel iedereen dodelijk is.

Stochastische stralingsschade is schade die pas op lange termijn blijkt door het toenemend aantal gevallen van ziekten waarvan straling als een van de oorzaken aangemerkt kan worden. In dit geval neemt niet de ernst van de ziekte, maar het aantal gevallen van de ziekte toe met de dosis. Het effect van kleine doses is onderwerp van discussie. Sommigen nemen een sterker dan lineair verband aan tussen dosis en gevolg, anderen stellen weer dat dit juist minder dan lineair moet zijn. Als standaard wordt een lineair verband aangenomen:

$$E_l = R_l\, N\, D_i. \qquad (2)$$

Hierin is E_l het aantal latente effecten; R_l het risico-getal (Sv^{-1}), dit is afhankelijk van de demografische samenstelling van de beschouwde groep; D_i de individueel ontvangen dosis (Sv); N het aantal besmette personen. Voor het late effect van sterfte en genetische schade in de volgende twee generaties voor een groep slechts bestaande uit volwassenen wordt door de ICRP[7] een risicogetal $R_l = 1{,}65 \times 10^{-2}$ gehanteerd. Voor kinderen gelden veelal hogere waarden.

De voor de dosisbepaling benodigde gegevens vertonen een grote spreiding; er moet een keuze gemaakt worden uit de beschikbare gegevens[8,9]. Waarden voor dosisconversiefactoren zijn te vinden in diverse rapporten[1,10,11].

Onzekerheden

De bruikbaarheid van de uitkomsten van een rekenmodel is afhankelijk van de nauwkeurigheid waarmee het model de fysische werkelijkheid beschrijft. Onderstellingen die voor een deelmodel worden gemaakt, kunnen onjuist blijken te zijn en er is vaak onzekerheid over de waarden van in te voeren modelparameters.

De beste methode om model-onzekerheden te behandelen, is het vergelijken van de modelresultaten met veldmetingen en laboratorium-experimenten, waarna de parameters kunnen worden geoptimaliseerd. Veelal is dit uit praktisch oogpunt onmogelijk.

Een andere mogelijkheid om zicht te krijgen op de waarde van de voorspellingen van een model is deze te vergelijken met uitkomsten van andere modellen. Bij veel modellen wordt echter gebruik gemaakt van dezelfde of soortgelijke deelmodellen, zodat de uitkomsten afhankelijk van elkaar zijn.

Ten slotte bestaat nog de mogelijkheid van een gevoeligheidsanalyse. De parameters worden dan ondersteld aan een bepaalde kansverdeling te voldoen. Door de parameters binnen hun kansruimte te variëren, kan men inzicht krijgen in de kansverdeling van de resultaten en zien van welke parameters de spreiding van de resultaten het sterkst afhangt. Een betere kennis van deze parameters leidt tot een scherper gedefinieerd resultaat (binnen de begrenzingen van het model!).

Afgezien van de op voorhand onbekende bronterm zitten bij het Gauss-pluimmodel de grootste onzekerheden in de bepaling van de atmosferische stabiliteitsklasse, de dispersieparameters en de depositiesnelheden. In de dosimetriemodellen zijn de uitkomsten van de berekening van de interne dosis nogal gevoelig voor de modellering van het proces van biologische verwijdering van nucliden uit het lichaam.

Consequentie-berekeningen

Naar aanleiding van het ongeval te Tsjernobyl heeft de overheid het ECN opdracht gegeven om onder meer nieuwe consequentie-berekeningen uit te voeren. De resultaten hiervan zullen binnenkort door de overheid worden vrijgegeven. Om toch een indruk te geven van de uitkomsten van zulke berekeningen, worden in *tabel 1* enkele (bewerkte) resultaten gepresenteerd uit het BKEV-rapport van de Gezondheidsraad[12]. Deze berekeningen zijn uitgevoerd voor een tweetal brontermen, aangeduid met KEH en KMM. Deze brontermen representeren resp. een lozing uit het midden en aan de hoge kant van het spectrum van mogelijke brontermen. Voor de berekeningen is gebruik gemaakt van het bij ECN ontwikkelde rekenmodel NUDOS.

Tabel 1. Resultaten van de consequentie-berekeningen (onder) voor resp. een middelgrote (KEH) en een grote bronterm (KMM) (boven). De berekeningen zijn steeds uitgevoerd voor vier weertypen (instabiel, neutraal, stabiel en neutraal met regen) en ook is er per categorie slachtoffers een gemiddeld aantal berekend. (Ontleend aan het BKEV-rapport van de Gezondheidsraad[12].)

		KEH	KMM
Lozingsfracties van de reactorinhoud aan:			
Xe, Kr		9×10^{-1}	1×10^{0}
I		7×10^{-3}	1×10^{-1}
Cs, Rb		5×10^{-5}	1×10^{-1}
Te, Sb		3×10^{-5}	3×10^{-1}
Ba, Sr		6×10^{-6}	1×10^{-2}
Ru, Rh, Co, Mo, Tc		2×10^{-6}	2×10^{-2}
Lantaniden		4×10^{-7}	3×10^{-3}
Tijd tussen ongeval en lozing (uren)		24	2
Duur van de lozing (uren)		0,5	3
Verwacht aantal acute slachtoffers (sterfte binnen 30 dagen)	instabiel	0	0
	neutraal	0	150
	stabiel	0	780
	neutr. + regen	0	340
	gemiddeld	0	220
Verwacht aantal latente slachtoffers (sterfte binnen 50 jaar en genetische schade in volgende generaties tgv. 24 uur blootstelling)	instabiel	40	2900
	neutraal	40	3100
	stabiel	110	1100
	neutr. + regen	25	1800
	gemiddeld	45	2500
Afstand in km langs de pluimas waar het niveau van 0,5 Sv wordt overschreden in de periode van 1 week – 1 jaar na ongeval	instabiel	–	5
	neutraal	–	20
	stabiel	2	23
	neutr. + regen	–	30
Afstand in km langs de pluimas waar niveau van 0,05 Sv wordt overschreden in de periode van 1 week – 1 jaar na het ongeval	instabiel	–	42
	neutraal	3	80
	stabiel	6,5	44
	neutr. + regen	2,7	80

De processen van atmosferische verspreiding, depositie van nucliden en blootstelling aan straling zijn in NUDOS op soortgelijke wijze gemodelleerd als in RSS[1]. Voor de dosis-conversierelaties zijn recentere publikaties verwerkt[10,11].

Voor wat de ernst van de gevolgen van een incidentele radioactieve lozing betreft, kan niet één enkel criterium worden gehanteerd. In het BKEV-rapport van de Gezondheidsraad[12] wordt gekeken naar een drietal criteria:

- Het aantal directe dodelijke slachtoffers.
- Het aantal extra geïnduceerde dodelijke kankergevallen en ernstige genetische schade ten gevolge van verblijf in het besmette gebied voor een korte periode direct na de lozing (b.v. 24 uur).
- De omvang van het gebied dat geruime tijd niet kan worden betreden of niet bewoonbaar is, met als criterium de potentiële dosis in een bepaalde periode (b.v. van 1 week tot 1 jaar).

De berekeningen zijn uitgevoerd voor de reactorinhoud na een aantal brandstofcycli van een 1000 MWe kernreactor en een hypothetische vestigingsplaats met een uniforme bevolkingsdichtheid: 200 p/km^2 in het gebied tussen 1,5 en 5 km van de reactor en 400 p/km^2 daarbuiten (ongeveer het gemiddelde voor Nederland); het gebied binnen een straal van 1,5 km werd onbewoond ondersteld.

Tabel 1 geeft nu een overzicht van de uitkomsten van de consequentie-berekeningen uit het BKEV-rapport voor bovengenoemde criteria. De berekeningen zijn uitgevoerd voor vier weertypen die representatief zijn voor het hele spectrum van weertypen. Het berekende gemiddelde van een aantal gevolgen is gewogen met het relatieve voorkomen van de weertypen in Nederland. Aan de gegeven getallen mag echter geen absolute waarde worden gehecht: de onzekerheid in de gebruikte parameters van het Gauss-pluimmodel introduceert al een onzekerheid in de uitkomsten van ca. een factor twee!

De grootste bronterm (KMM) correspondeert met een lozing in de orde van 10% van het ongeval te Tsjernobyl, met gevolgen naar evenredigheid. Hoewel de aantallen late slachtoffers groot zijn, moet bedacht worden dat deze aantallen overeenkomen met enkele promillen van de 'natuurlijke' kankerincidentie voor de bevolking van het besmette gebied in dezelfde periode. Deze verhoging zal dan ook nooit gesignaleerd kunnen worden, omdat de jaarlijkse variatie in de kankerincidentie veel groter is. Veel sprekender zijn daarom de aantallen directe dodelijke slachtoffers. Bij het ongeval te Tsjernobyl vielen geen directe slachtoffers te betreuren, met uitzondering van mensen die nauw betrokken waren bij de bestrijding van de daar opgetreden brand. Dit kwam doordat de lozing met veel warmte gepaard ging, waardoor het grootste deel van de radioactieve stoffen rechtstreeks in hogere luchtlagen terecht kwam. Bij een 'koude' lozing zouden vele directe slachtoffers te betreuren zijn geweest. Het zal duidelijk zijn dat de overheid alleen dan de bouw van een nieuwe kerncentrale zal kunnen toestaan als kan worden aangetoond dat lozingen van deze orde van grootte voor de betrokken centrale een wel extreem kleine kans van optreden hebben!

Onderzoek bij het ECN

Experimenteel onderzoek op het gebied van 'severe accidents' is zeer kostbaar. Het onderzoek kan verdeeld worden in integrale tests, waarvoor grote en kostbare installaties nodig zijn, en onderzoek naar een aantal specifieke problemen. Het zwaartepunt van het onderzoek naar reactorveiligheid ligt momenteel in landen waar een aanzienlijk industrieel programma wordt uitgevoerd. In Nederland, waar reactoren in gebruik zijn en mogelijk nog zullen worden gebouwd, dient men in elk geval op de hoogte te zijn en te blijven van de ontwikkelingen op dit gebied.

Het ECN-onderzoek dat in samenwerking met de KEMA, elektriciteitsbedrijven en overheid plaatsvindt, richt zich vooral op het kennisnemen van de resultaten uit het onderzoek van anderen en op het toepasbaar maken van deze resultaten voor de Nederlandse situatie. Hiertoe participeert Nederland in onderzoek dat door de Amerikaanse Nuclear Regulatory Commission (US-NRC) is uitgestippeld. De in de USA ontwikkelde rekencodes worden bij het ECN voor Nederland operationeel gemaakt en het ECN levert een bijdrage aan de 'assessment' van deze rekencodes.

Deze assessment vindt plaats door deel te nemen aan internationale werkgroepen zoals die zijn opgezet door de US-NRC, de Europese Commissie en het Committee Safety Nuclear Installations (CSNI) van de OESO. Verder worden bij het ECN ook rekenprogramma's ontwikkeld, zoals PHAMISS (een programma voor betrouwbaarheidsanalyse) en CHARME (een programma voor de bepaling van o.a. de dynamische belasting op pijpsystemen).

Bij het ECN vindt theoretisch onderzoek plaats op het gebied van stoomexplosies. Theoretische modellen die het stoomexplosie-proces beschrijven, worden daarbij getoetst aan elders verkregen experimentele resultaten. Uit dit onderzoek is onder meer gebleken dat het omzettingsrendement van thermische energie van het gesmolten kernmateriaal naar vrijkomende mechanische energie in de orde van 1 à 2% ligt. De conclusie in de laatste alinea van de paragraaf 'Penetratie door een projectiel' is op dit onderzoek gebaseerd.

De bij het ECN operationeel gemaakte programma's worden toegepast om procedures voor accident management te ontwikkelen dan wel te controleren. Deze activiteit vindt plaats in nauwe samenwerking met de overheid en de staven van de kerncentrales te Dodewaard en te Borssele. Ondanks de beperkte middelen vindt bij het ECN ook experimenteel onderzoek plaats, en wel op het gebied van chemische verbindingen onder condities waarbij de kern desintegreert, alsook op het gebied van aerosoltransport, in het bijzonder onder condities waarbij stoom condenseert op de koude wand.

Referenties

1. N.C. Rasmussen, Reactor Safety Study, WASH-1400, NUREG 75/014, 1975.
2. R. Wilson ea. (1985), Report to the American Physical Society of the Study group on Radionuclide Release from Severe Accidents at Nuclear Power Plants.
3. H.G. Friedrichs en E. Schrödl, Neue Ergebnisse zur Spaltproduktfreisetzung aus dem Kern und Reaktorgebäude bei Unfälle, GRS-Fachgespräch, November 1986.
4. Deutsche Risiko Studie Kernkraftwerke, Unfallfolgenrechnung und Risiko Ergebnisse; Fachband 8. TUV Rheinland, 1980.
5. W.A. Smit, R. Geerts en G. Tiemessen, Ahaus, Lingen en Kalkar, Westduitse nucleaire installaties en de gevolgen voor Nederland, WRR-V31, Staatsuitgeverij 's Gravenhage, 1983.
6. NUREG (1977), Calculation of annual doses to man from routine releases of reactor effluents for the purpose of evaluating compliance with 10 CFR Part 50, appendix 1. Regulatory Guide 1.109 rev. 1.
7. ICRP (1977), Publication 26 – Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annuals of the ICRP.
8. Störfall-Leitlinien, Bundesanzeiger Nr. 245a. December 1983.
9. IAEA, Generic models and parameters for assessing the environmental transfer of radionuclides from routine releases. Safety Series 57 (1982) 60.
10. J.E. Till en H.R. Meijer, Radiological Assessment; A Textbook on Environmental Doses Analysis, NUREG/CR-3332, 1983.
11. D. Charles ea. (1982), DOSE-MARC, The dosimetric module in the methodology for assessing the radiological consequences of accidental releases, NRPB-M74.
12. Gezondheidsraad (1984), Advies inzake de Bronterm van Kerncentrales en Volksgezondheid (BKEV).

Toekomstige technologische ontwikkelingen in de kernenergie

De toegepaste en toe te passen technologie in de kernenergie worden in belangrijke mate bepaald door de beschikbaarheid van de grondstof uranium en de veiligheidseisen. Volgens de laatste inventarisatie van de OECD/IEAE zal er tot het jaar 2025 zeker geen tekort aan uranium ontstaan, temeer omdat er nog mogelijkheden zijn om het verbruik te verminderen (laserverrijking, conversiereactor). Na 2025 zal het uraniumverbruik worden aangepast aan de dan bekende voorraden door de keuze van het reactortype: tegen die tijd zijn de kweekreactoren volledig ontwikkeld en waarschijnlijk concurrerend met de LWR's wegens de gestegen uraniumprijs.

De veiligheidseisen zullen hun invloed blijven hebben op de ontwerpen voor kerncentrales. Er wordt verwacht dat men meer en meer passieve of inherente veiligheid zal eisen. Reactortypes die hieraan goed kunnen voldoen, zoals de BWR, verdienen de voorkeur.

Men beschouwt nu 1300 MWe als een bovengrens van de industriestandaard. Er wordt niet meer gestreefd naar een verhoging van deze standaard, o.a. omdat het economische risico van een grotere eenheid in een koppelnet te groot wordt en te veel aanpassingen vraagt.

De moderne met gas gekoelde reactoren en kweekreactoren hebben dezelfde stoomcondities (temperatuur en druk) als conventionele centrales en hebben dus hetzelfde rendement (40%). In de toekomst zal dit niet hoger komen te liggen, vanwege de materiaalproblemen bij hogere temperatuur. De lichtwaterreactoren zullen om dezelfde redenen hun lagere rendement (32%) blijven houden. Alleen bij kerncentrales met gaskoeling zou het rendement hoger kunnen komen, door toepassing van voorgeschakelde nucleaire gasturbines.

De markt wordt nu gedomineerd door een aantal reactortypes: LWR (PWR en BWR) en zwaarwaterreactoren voor wat betreft de commerciële elektriciteitsproductie. Er zijn een aanzienlijk aantal met gas gekoelde grafietreactoren in bedrijf, maar dit aantal zal niet meer toenemen. In ontwikkeling voor de verre toekomst zijn de met natrium gekoelde kweekreactor en de hoge-temperatuurreactor met gaskoeling. De eerste vanwege zijn lage uraniumverbruik, de tweede vanwege de toepassingsmogelijkheden voor chemische processen bij hoge temperatuur en de mogelijkheid om thorium als kweekstof te gebruiken.

De technologie voor de met natrium gekoelde kweekreactor is reeds bewezen. Het gaat er nu om langdurige bedrijfservaringen op te doen en de kostprijs van de centrale te verlagen. De hoge-temperatuurreactor met gaskoeling is nog in een eerder ontwikkelingsstadium.
De verdere ontwikkeling van de *drukwaterreactor* is erop gericht om een hogere conversiefactor te bereiken. Hiertoe moet voornamelijk de reactorkern gewijzigd worden. De technologie van de warmteafvoersystemen blijft de zelfde.
Men wil de conversiefactor op 0,9 of 0,95 brengen. Hiertoe is het nodig om de verhouding moderator/splijtstof van 2 op ongeveer 0,5 te brengen. In vergelijking met een nu toegepaste PWR bereikt men op deze manier in een gesloten splijtstofkringloop een driemaal zo goed gebruik van de grondstof (natuurlijk uranium). Het ontwikkelingswerk is erop gericht om deze modificatie ook in bestaande PWR-installaties te kunnen aanbrengen.
De inzet van dit reactortype wordt door de economische factoren bepaald. Als men ervan uitgaat dat voor een conversiereactor de investerings- en bedrijfskosten gelijk zijn aan die van een PWR (wat gerechtvaardigd is gezien de toepassing van dezelfde componenten: drukvat, warmtewisselaars en pompen), dan zijn de splijtstofkosten bepalend. De PWR heeft bij de huidige uraniumprijs nog economische voordelen, maar bij een prijsstijging op de uraniummarkt begint de conversiereactor concurrerend te worden.
Het huidige ontwikkelingswerk is erop gericht om tegen 1993 de technologie van de conversiereactor te kunnen demonstreren. Het is de vraag of de te ontwikkelen conversiereactor kan voldoen aan de eisen van inherente veiligheid, zoals deze de laatste jaren worden geformuleerd.

In een internationale samenwerking tussen Zweden, de VS en Japan (ASEA, General Electric, Japan Atomic Power Company) zijn verbeterde ontwerpen gemaakt voor *kokendwaterreactoren*. Daarbij wordt aandacht besteed aan verbetering van betrouwbaarheid en beschikbaarheid, vermindering van tijd nodig voor periodieke inspectie, stralingsbelasting en verbetering van werkomstandigheden. Dit wordt o.a. bereikt door betere lay-out en de toepassing van robots. Door meer prefabricage in de fabriek wil men de bouwtijd verkorten en dus de bouwkosten verlagen. Er wordt verwacht dat de bovengenoemde verbeteringen de totale prijs constant zullen houden (uitgedrukt in guldens van 1986), omdat er waarschijnlijk ook factoren zijn die de prijs zullen verhogen, zoals extra veiligheidsmaatregelen. Ten aanzien van de veiligheid streeft men naar een ontwerp dat in staat is grote storingen zelf op te vangen, zonder ingrijpen van mensen of beveiligingsapparatuur: inherente of passieve veiligheid. De BWR heeft hiervoor principieel een aantal mogelijkheden, zoals het toepassen van natuurlijke circulatie in de reactorkern, waardoor de koeling niet afhankelijk wordt van pompen.
Bovengenoemde ontwerpverbeteringen gelden ook voor nieuw ontworpen 600 MWe-eenheden, waarvoor belangstelling bestaat omdat de totale investering kleiner is en de eenheid beter in de netstructuur past.



De *hoge-temperatuurreactor met gaskoeling* (HTGR) heeft twee ontwikkelingsrichtingen, die overigens gecombineerd kunnen worden: één waarbij uit thorium splijtbaar U-233 gemaakt wordt en één waarbij bij hoge temperatuur proceswarmte wordt opgewekt. Het gebruik van thorium geeft toegang tot een zeer grote voorraad energiegrondstof, waarvoor de splijtstofcyclus nog op industriële schaal ontwikkeld moet worden.

Gebaseerd op de ervaringen met de HTGR's in West-Duitsland en in de VS zijn modulaire reactoren ontworpen met een vermogen van 150 à 200 MWth, die in serie gebouwd zouden moeten worden. Of deze papieren ontwikkelingen ooit gerealiseerd zullen worden, is zeer de vraag.

De nadruk bij de verdere ontwikkeling van de *zwaarwaterreactor* ligt op het gebied van het voldoen aan de zich wijzigende eisen van de klanten, zowel bestaande als nieuwe. Dit betreft zowel het vermogen van de centrale als bedrijfskenmerken zoals belastingsfactor en load following-gedrag. Men denkt aan vermogensgroottes van 300 tot 1000 MWe. Voor nieuwe markten, zoals levering van proceswarmte voor tertiaire oliewinning, oliewinning uit 'tar-sands' en waterontzilting, dient het ontwerp te worden aangepast.

Een andere ontwikkeling bij de CANDU-reactor is de verlenging van de levensduur. Men kan dit bereiken door de zwaarst belaste onderdelen, de

drukpijpen, te verwisselen. Na een dergelijke verwisseling en een totale inspectie is het mogelijk dat de reactor nog weer 20 à 25 jaar dienst doet. De elektriciteits-opwekkingskosten worden dan zeer laag, doordat de investering reeds voor het grootste deel is afgeschreven.

In Frankrijk en Rusland is men ver gevorderd met de ontwikkeling van de met natrium gekoelde *kweekreactor*. In enkele stappen (25 MWe, 250 MWe, 1200 MWe (Frankrijk) en 12 MWe, 300 MWe, 600 MWe (Rusland)) zijn grote centrales ontwikkeld en in bedrijf gesteld. Hierdoor is men in staat de ervaring op te doen die nodig is om nieuwe centrales te ontwerpen. Er wordt niet verwacht dat toekomstige kweekreactorcentrales groter zullen zijn, wel economischer.

Principieel worden er in het Franse ontwerp geen wijzigingen verwacht, wel een groot aantal technologische verbeteringen.
Als vervolg op de bouw van de Phenix en de Super Phenix wil men de Super Phenix-2 (SPX-2) bouwen, die gevolgd wordt door de eerste van de seriebouw. Men verwacht dat de elektriciteitsopwekkingskosten voor de SPX-2 30 tot 60% hoger liggen dan die van een LWR en dat die van de eerste van de serie ongeveer gelijk zullen zijn aan die van een LWR.
Evenals bij de met gas gekoelde reactoren heeft men (vooral in de VS) ontwerpen gemaakt voor kleine modulaire met natrium gekoelde kweekreactoren. Ook hier is het de vraag of deze gerealiseerd zullen worden.
De toepassing van kernenergie voor proceswarmte bij hoge temperatuur is in principe beschikbaar, maar ligt om economische redenen nog ver weg. Het belastingspatroon en de gevraagde energiehoeveelheden verschillen nog te veel van de economisch optimale kernreactor. Waarschijnlijk zal de kernreactor eerder toegepast worden voor stadsverwarming, vooral in streken met een lange winter en ver verwijderd van andere energiebronnen.

Voor alle kerncentrales geldt dat er een tendentie is om de technische levensduur te vergroten van 25 à 30 jaar tot 40 en zelfs 60 jaar. Dit kan bij de bouw door de juiste materiaalkeuze al gerealiseerd worden, of men vervangt na 20 à 25 jaar de zwaarst belaste onderdelen en inspecteert en kwalificeert de rest van de installatie. De nieuwe inspectietechnieken maken dit mogelijk.

De verbeterde splijtstof staat het toe de periode tussen twee splijtstofwisselingen te vergroten tot 18 maanden. Bij installaties voor stadsverwarming spreekt men zelfs van perioden van 10 jaar tussen twee splijtstofwisselingen.

Hoewel uit economische overwegingen 'grondlastbedrijf' van een kerncentrale de voorkeur verdient, is het technisch goed mogelijk om te voldoen aan de eisen van het elektriciteitsnet wat betreft het volgen van de dagelijkse belastingswisselingen.
De lozingen van kernenergiecentrales worden steeds verder teruggedrongen door de technologische verbeteringen van filters enz.

In het algemeen kan men zeggen dat men in Nederland de voordelen nog niet goed weet te waarderen van een energiebron die bij normaal functioneren zeer kleine lozingen heeft, maar waaraan het risico is verbonden van een zeer kleine kans op grote gevolgen, hoewel uit de laatste onderzoekingen blijkt dat de te verwachten gevolgen beperkt blijven en acceptabel zijn, zelfs in dichtbevolkte gebieden. Kernenergie heeft de eigenschappen van een energiebron voor de toekomst; in Nederland moet men nog leren om deze eigenschappen op de juiste wijze te benutten. Mogelijk kan een integrale risicovergelijking van de verschillende energiebronnen daartoe bijdragen.

G.A. de Boer

Ir. G.A. de Boer heeft zich van 1964 tot 1981 beziggehouden met kerntechniek (Neratoom) en kernenergievraagstukken (Brede Maatschappelijke Discussie). Sedertdien heeft hij als medewerker van General Technology Systems (Netherlands) b.v. te Den Haag een studie gemaakt van zonne-energie (fotospanningscellen) en windenergie.

Boekbespreking

R. Kippenhahn, Light from the Depths of Time, paperback Springer Verlag, 1987, 262 blz., 87 figuren, DM 54,—.

Dit boek, een Engelse vertaling van de oorspronkelijke Duitse versie (1984), gaat over kosmologie – de leer van het ontstaan en de bouw van het heelal. Vooral in deze eeuw zijn grote vorderingen op dit gebied gemaakt. Kosmologie heeft iets van een legpuzzel: steeds meer stukjes kunnen op bevredigende wijze worden ingepast. De puzzel is nog niet af, maar er liggen al voldoende stukken om het geheel te kunnen overzien, en de meeste deskundigen denken dat het scenario van het ontstaan van het heelal in grote lijnen bekend is. Dit zou dan als een van de grote wapenfeiten van de moderne natuurwetenschap beschouwd kunnen worden.

Het boek is niet geschreven voor specialisten, en er staat vrijwel geen formule in. Enige 'technische' onderwerpen, zoals het verband tussen frequentie en golflengte en de stellaire parallax, worden in appendices behandeld.
Andere stukjes fysica worden uitgelegd met behulp van de dolle dromen van een zekere Herr Meyer: b.v. ruimtereizen op intergalactische schaal, en een radiozender waarvan de frequentie steeds verder wordt verhoogd, totdat de antenne gammastralen gaat uitzenden. Hierbij liet de auteur zich inspireren door Gamow, die Mr. Tompkins voor soortgelijke doeleinden schiep. Meyer ontmoet Tompkins trouwens in een van zijn dromen.
Een punt dat enkele keren ter sprake komt, is de paradox van Olbers: waarom is de hemelachtergrond donker. Beschouw een oneindig groot stationair heelal, met een redelijke uniforme verdeling van sterren. Vroeg of laat moet de gezichtslijn op een ster uitkomen; daarom zou men een heldere hemelachtergrond verwachten.

De paradox vindt een logische verklaring door de lage sterdichtheid, gecombineerd met de expansie van het heelal. Als we naar de hemel kijken, dan kijken we terug in de tijd, tot enige honderdduizenden jaren na de Big Bang, toen het heelal transparant werd voor thermische straling, bij een temperatuur van enige duizenden graden. Verder kunnen we niet kijken! De thermische straling is inmiddels, door de expansie van het heelal, afgekoeld tot ongeveer 3 K, onzichtbaar dus. Deze microgolf-achtergrondstraling is dus het 'light from the depths of time'.

Het boek is zorgvuldig geschreven en vrijwel vrij van fouten. Een paar onvolkomenheden: de piloot van het in 1960 neergeschoten U-2-vliegtuig heet Francis Gary Powers en niet Francis Harry Powers; op een bepaald moment krijgt de lezer de indruk dat RR Lyrae variabele sterren hetzelfde zijn als kortperiodieke Cepheïden, maar dat kan nooit de bedoeling van de auteur geweest zijn; het is vreemd dat de auteur het Hertzsprung-Russell-diagram niet ter sprake brengt; de stralingswet van Planck wordt wel genoemd maar niet uitgelegd: de term 'blackbody radiation' wordt niet gebruikt.

Hoewel het niveau vrij elementair is, zullen niet-astronomen het een en ander uit dit boek kunnen leren. Het boek leest vrij vlot en gemakkelijk. De grote lijnen van de kosmologie worden helder uiteengezet, logische verbanden worden zo veel mogelijk gelegd. Een boek om aan te schaffen? Voor degenen die zich in een paar uurtjes prettig lezen op de hoogte willen stellen, ja; voor degenen die wat meer substantie willen, nee.

H.W.J. Blöte.

Enige berekeningen aan de reactor te Tsjernobyl

W.J. Oosterkamp

Een goed begrip van een ongeluk is een vereiste om van de fouten van anderen te kunnen leren en om een herhaling uit te sluiten. In het onderhavige geval is het ideaal voor de analyse een driedimensionaal gekoppeld neutronenfysisch en thermohydraulisch computerprogramma. Voor inzicht zijn ook deelanalyses echter onontbeerlijk; deze zijn uitgevoerd bij de KEMA en zullen in het volgende kort worden beschreven. Helaas bleken de ter beschikking staande gegevens onvoldoende om tot een sluitende verklaring te komen

De analyse die door het Sovjet-comité is gemaakt van het ongeluk van de eenheid 4 te Tsjernobyl, wierp al in een vroeg stadium enige vragen op. Door het uitvoeren van een aantal berekeningen hebben wij getracht duidelijkheid te scheppen. Zo'n analyse van het ongeluk wordt bemoeilijkt door een aantal handicaps. Er staat maar een beperkt aantal feiten vast, te weten:

- Er was een explosie waarbij materiaal uit de reactor werd geworpen.
- Er was een tweede explosie, waarbij splijtstof en grafiet werden uitgeworpen.
- Er werden buiten het reactorgebouw grafietblokken gevonden.
- De gebouwen zijn ernstig beschadigd.
- De kraan en de splijtstofwisselmachine zijn omgevallen.
- De plaat boven de reactor werd rechtop gevonden.
- Alle splijtstofkanalen waren afgebroken.
- De kettingreactie stopte.

Door de Russische staatscommissie voor het gebruik van de atoomenergie is er een simulatie gemaakt, die in Wenen tijdens de Post accident review meeting van het IAEA is gepresenteerd. Hierin staat een beperkt aantal meetgegevens vermeld. Voor het overige moet men afgaan op berekeningen. Een herhaling van het 'experiment', om hypotheses te toetsen, kan uiteraard niet worden aanbevolen.

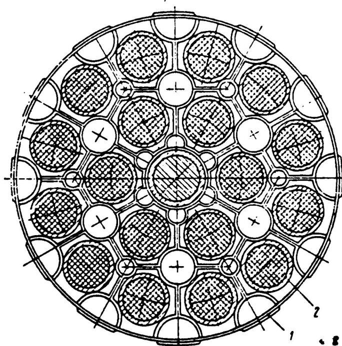
Bij de reactiviteitsberekeningen die door ons zijn uitgevoerd, is o.a. nagegaan of de bijdrage van de dampbellen (zie dit nummer blz. 70) groot genoeg was om een ongeluk van de hierboven geschetste omvang te kunnen hebben veroorzaakt — dit bleek niet het geval te zijn. Ook hebben wij ons beziggehouden met de constructie van de uitschakelstaven.

Reactiviteits-effecten

De verschillende bijdragen aan de reactiviteit – van de dampbellen, van het Doppler-effect, door de temperatuurcoëfficiënt van de moderator en van de regelstaven – zijn berekend aan de hand van een vereenvoudigd model van een splijtstofbundel (*fig. 1*) en het omringende grafiet. Aan de grenzen van deze 'macrocel' werden 'reflecterende' randvoorwaarden aangenomen. In het model waren de splijtstofelementen (-'pennen') op een vierkant rooster geplaatst en hun aantal (18) werd gereduceerd tot 16, met behoud van de hoeveelheid uranium. Ook voor de drukbuis werd een vierkante vorm aangenomen; zie *fig. 2*.

De berekening aan een macrocel met één splijtstofbundel is uitgevoerd voor drie graden van versplijting. In een reactor treft men tegelijkertijd bundels aan met een verschillende versplijtingsgraad.
Daarna hebben wij gerekend aan een veel grotere macrocel, die 14 splijtstofbundels en twee regelstaven bevatte.

Laat men, als eerste benadering, de lek en de absorptie door de verontreinigingen in het grafiet en in de afstandshouders van de splijtstofstaven buiten beschouwing, dan is de reactiviteit ϱ van de dampbellen bij lage dichtheid van het koelmiddel nogal hoog (0,025 à 0,030). Neemt men deze effecten wèl in aanmerking en houdt men er rekening mee dat de mate van versplijting niet voor alle staven dezelfde is, dan komt ϱ niet hoger dan 0,02. Corrigeert men ook nog



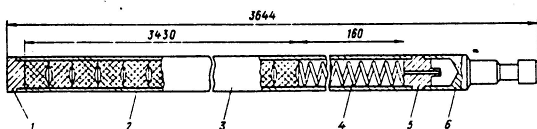


Fig. 1. *Boven*: Doorsnede van een splijtstofbundel van de reactor te Tsjernobyl. Binnen een cilindrische omhulling, de drukbuis, bevinden zich 18 splijtstofelementen ('pennen'), die op hun plaats worden gehouden door een raamwerk van afstandhouders. *Onder*: Lengtedoorsnede van een splijtstofelement. *1* Afsluitkop. *2* Splijtstoftablet. *3* Omhulling. *4* Veer. *5* Ondersteuning. *6* Onderste geleidestuk.

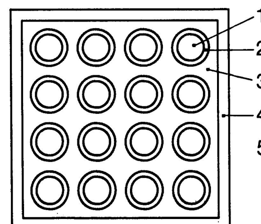


Fig. 2. Bij de berekeningen gebruikt model van een splijtstofbundel. *1* Splijtstof. *2* Bekleding. *3* Koeling. *4* Drukpijp. *5* Grafiet.

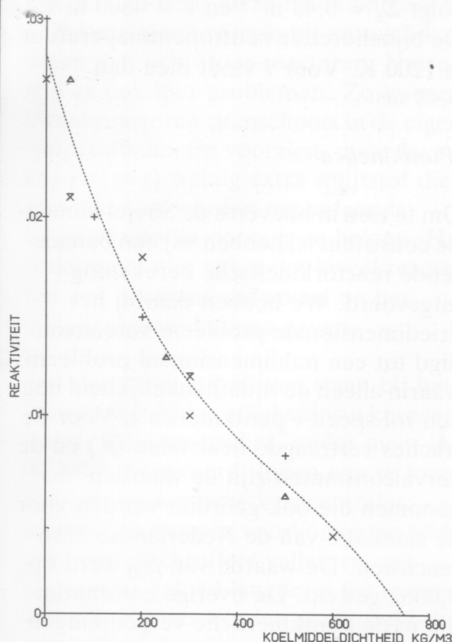


Fig. 3. Berekende bijdrage van de dampbellen aan de reactiviteit als functie van de dichtheid van het koelmiddel. De punten +, × en △ representeren uitkomsten van buitenlandse collega's, de punten ⤫ zijn van ons.

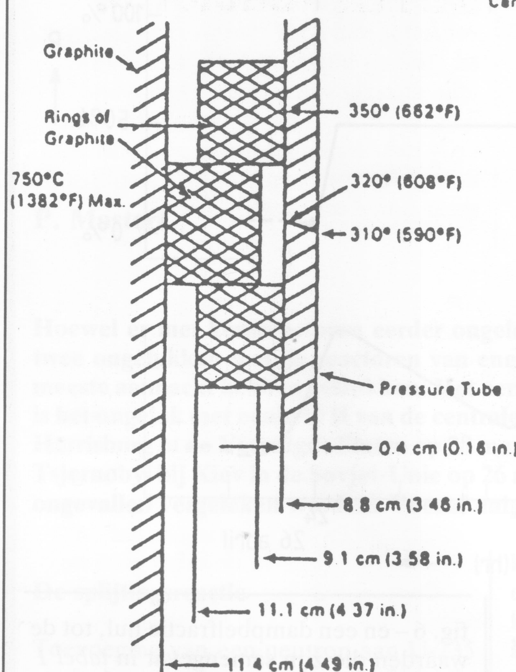


Fig. 4. Maatschets van de grafietringen die het warmtecontact tussen een drukbuis en het omringende grafiet verzorgen.

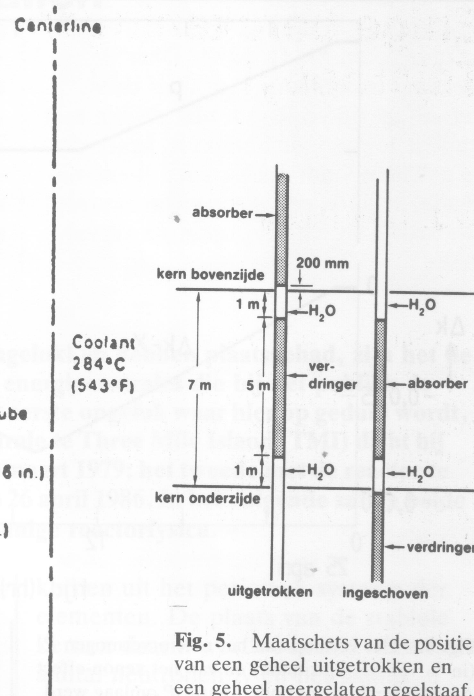


Fig. 5. Maatschets van de positie van een geheel uitgetrokken en een geheel neergelaten regelstaaf.

voor het feit dat bij een lage koelmiddeldichtheid de lek groter is dan normaal, dan is de dampbelreactiviteit ten hoogste 0,015. Aan het eind van dit hoofdstuk komen we op de betekenis van dit getal terug.

Daar de berekeningen niet getoetst konden worden aan experimentele gegevens van soortgelijke reactoren, hebben wij ze vergeleken met langs informele weg verkregen resultaten van buitenlandse collega's. Deze stemden redelijk met de onze overeen; zie *fig. 3*.

Het verschil Δk in de vermenigvuldigingsfactor bij twee temperaturen (T_1 en T_2) ten gevolge van het Doppler-effect wordt goed beschreven door de formule

$$\Delta k = \alpha(T_1^{1/2} - T_2^{1/2}).$$

De evenredigheidsfactor α bedraagt volgens onze berekeningen voor de reactor te Tsjernobyl $1{,}0 \times 10^{-3}$. Dit leidt voor de waarde van de desbetreffende reactiviteitscoëfficiënt $\partial\varrho/\partial T$ tot een waarde van ca. 17×10^{-6} voor de normale situatie en van 12×10^{-6} voor het temperatuurgebied waarin het ongeval zich heeft afgespeeld. In het USSR-rapport wordt de waarde 12×10^{-6} genoemd, maar er wordt daar niet expliciet vermeld of deze betrekking heeft op de grootheid $\partial\varrho/\partial T$.

Bij de reactoren van het beschouwde type is niet alleen de dichtheidscoëfficiënt van het koelmiddel positief, maar ook de temperatuurcoëfficiënt van de moderator. Wij hebben nagegaan of veranderingen in de moderator van invloed geweest kunnen zijn op het verloop van het ongeval. Uit de warmtecapaciteit en de warmtegeleidingscoëfficiënt van het grafiet kan de indringdiepte van een snelle temperatuurstijging bepaald worden. Bij 'direct contact' – zie hieronder – bedraagt deze voor een tijdsduur van 10 s – dat is globaal de duur van het ongeluk – slechts 15 mm.

In werkelijkheid is er geen direct contact, maar kan de warmte het massieve grafiet alleen bereiken via achtereenvolgens een contactvlak tussen zirconiumpijp en grafietring, idem grafietring-grafietring en idem tussen grafietring en massief grafiet; zie *fig. 4*. De warmteovergang is dus veel slechter dan hierboven werd aangenomen, en de indringdiepte zal veel minder zijn geweest dan 15 mm. Een separate berekening van de plaatsafhankelijkheid van de temperatuurcoëfficiënt van de moderator laat zien dat zelfs bij een indringdiepte van 15 mm het reactiviteitseffect slechts 1/6 van het totale effect zou zijn en derhalve verwaarloosd kan worden.

De reactor heeft 211 regel- en noodstopstaven, die gelijkmatig over de reactor verdeeld zijn. Er kunnen voor iedere stand van een regelstaaf drie gebieden onderscheiden worden: water, absorberelement en verdringerelement ('displacer'); zie *fig. 5*. De bijdrage van het water is gebleken ongeveer de helft van het totale reactiviteitseffect van een regelstaaf te zijn; dit is van belang geweest voor het verloop van het ongeluk. In de toestand zonder dampbellen is het effect van de verdringers ten opzichte van dat van het water $\Delta\varrho = 0{,}05$ en van de regelstaven ten opzichte van de verdringers $\Delta\varrho = -0{,}12$. Bij aanwezigheid van dampbellen zijn de regelstaafeffecten iets groter

Bij het 'inlopen' van de noodstopstaven is de vermogensverdeling van groot belang. Bij een symmetrische verdeling zal het netto reactiviteitseffect nul zijn, daar het verlies aan reactiviteit boven in de reactorkern wordt gecompenseerd door een winst beneden in de reactorkern. Heeft de vermogensverdeling echter het maximum beneden in de kern, dan is er een netto positief effect. Vlak voor het ongeluk vertoonde de axiale vermogensverdeling een 'kamelenrug', waarbij de bovenste bult het grootst was. Er waren echter ca. twaalf regelstaven 1 à 2 m in de kern gestoken, zodat de flux in de bovenste twee meter zeer laag geweest moet zijn. Een netto positief reactiviteitseffect van $\Delta\varrho = 0{,}005$ lijkt maximaal mogelijk. Pas nadat de regelstaven meer dan een meter ingelopen waren – d.i. pas na drie seconden – kan het reactiviteitseffect negatief zijn geweest. We hebben aangenomen dat men ervoor gezorgd had – door de vermogensverdeling aan te passen – dat de noodstopstaven bij vol vermogen altijd een negatief reactiviteitseffect zouden hebben. (Sedert het ongeluk bevinden in alle reactoren van dit type de noodstopstaven zich altijd 1,2 m in de kern, zodat het beschreven positieve effect niet meer kan optreden.)

Een (positief) reactiviteitseffect van 0,005 van de noodstopstaven kan,

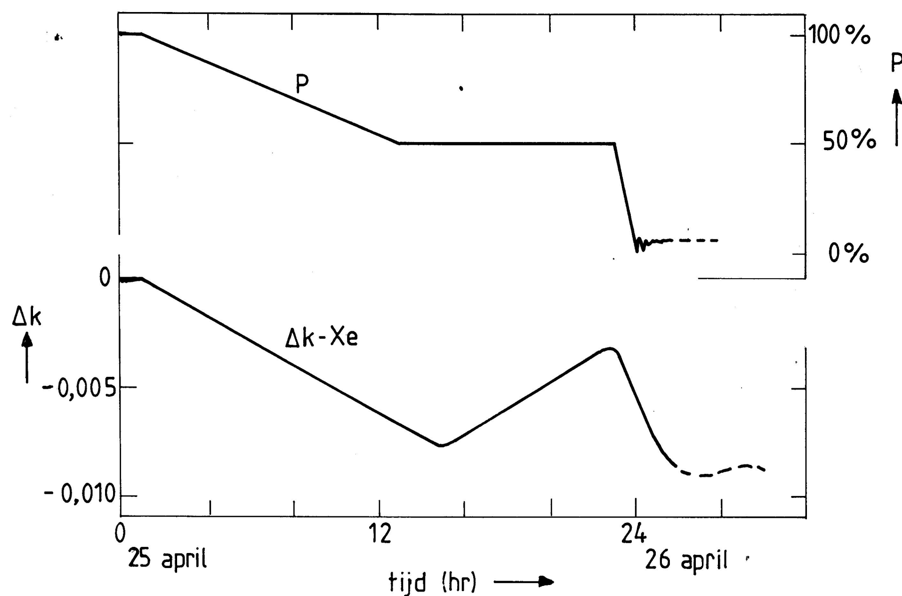


Fig. 6. Het verloop van het reactorvermogen P (in % van het maximum) en van het xenon-effect Δk gedurende de periode waarin P omlaag werd gebracht en ten slotte het ongeluk plaatsvond.

samen met het positieve dampbeleffect, de belangrijkste initiator van het ongeluk zijn geweest.

In *fig. 6*, ten slotte, de invloed van het xenon-effect gedurende het etmaal dat aan het ongeluk voorafging, waarin het vermogen van de reactor omlaag werd gebracht (zie het artikel van Mostert, dit nr. blz. 61).

Balans

Om te zien of de reactiviteitseffecten redelijk goed zijn berekend, kan men er een 'balans' van opmaken; de gezamenlijke effecten moeten elkaar nagenoeg compenseren. Bij vol vermogen (3200 MWth) was de dampbelfractie 35% en $k = 1{,}000$. Hiervan uitgaande komt men voor de toestand bij 5% van dit vermogen – d.i. de situatie om 24.00 uur, zie fig. 6 – en een dampbelfractie nul, tot de waarden die zijn samengevat in *tabel 1* onder A. Onder B zijn de bedragen vermeld die moeten worden toegevoegd om de situatie vlak voor het ongeluk te beschrijven. Voor de invloed van de regelstaven is bij de berekening aangenomen dat deze evenredig is met hun aantal, daar de regelstaven verspreid in de kern zitten. Gegeven de grote mate van onzekerheid is de balans redelijk kloppend te noemen.

Tabel 1. Balans van de berekende waarden van $\Delta\varrho$ voor het tijdstip 26 april 1986 01h00 (A) en voor het ogenblik vlak voor de fatale vermogensexcursie (B). Bij de berekening is uitgegaan van de situatie op vol vermogen (3200 MWth), met 35% dampbellen en $k = 1{,}000$.

A. Vermogen 5% (d.i.: 160 MWth), geen dampbellen:

30 regelstaven uitgetrokken	+0,015
Xenon-effect	−0,008
Doppler-effect $\Delta T = 300$ K	+0,004
Dampbellen	−0,005
Moderator $\Delta T = 100$ K	−0,007 +
	$k = 0{,}999$

B. Voor de situatie vlak voor het ongeluk moet hieraan worden toegevoegd:

20% dampbellen	+0,003
12 regelstaven van halve waarde	−0,003 +
	$k = 0{,}999$

Reactorkinetica

Om de snelle vermogenstoename zèlf te kunnen berekenen, moeten de gemiddelde levensduur van de neutronen en de gemiddelde fractie aan vertraagde neutronen bekend zijn. Deze fractie is afhankelijk van de mate van versplijting; bij 'oude' splijtstof is een deel van de energie afkomstig van de splijting van plutonium. Daarbij komen andere splijtingsprodukten vrij dan bij de splijting van uranium-235; het aantal kernen dat onder uitzending van een neutron vervalt, is aanzienlijk kleiner. De bijdrage van elk isotoop aan het totaal aantal splijtingen kan berekend worden. Met behulp van de fractie vertraagde neutronen per isotoop kan dan de gemiddelde fractie worden bepaald.

De levensduur van de prompte neutronen

De tijd τ tussen 'geboorte' en 'dood' van een neutronengeneratie is van belang voor de beschrijving van snelle vermogensexcursies. Deze kan voor thermische reactoren benaderd worden met

$$\tau = 1/\Sigma_a v \ .$$

Hierin is Σ_a de thermische werkzame absorptiedoorsnede en v de snelheid van het maximum van de thermische flux. Uit berekeningen voor Tsjernobyl volgt $\Sigma_a = 0{,}43\ \mathrm{m^{-1}}$ en $v = 4800\ \mathrm{m\ s^{-1}}$. De bijbehorende neutronentemperatuur is 1200 K. Voor τ vindt men dan 0,48 ms.

'Puntkinetica'

Om te zien in hoeverre de Sovjet-simulatie consistent is, hebben wij een benaderende reactorkinetische berekening uitgevoerd. We hebben daarbij het driedimensionale probleem vereenvoudigd tot een nuldimensionaal probleem, waarin alleen de tijdafhankelijkheid nog een rol speelt ('puntkinetica'). Voor de fracties vertraagde neutronen (β_i) en de vervalconstanten zijn de waarden genomen die ook gebruikt worden voor de simulatie van de Nederlandse kernreactoren. De waarde van β_{eff} werd op 0,0062 gesteld. De overige constanten die in de puntkinetische vergelijkingen optreden, komen aanstonds nog nader ter sprake.

Door τ niet op 0,48 ms te stellen maar op 0,75 ms, bleek het mogelijk het door de Sovjets gegeven vermogensverloop te reconstrueren. (Het verschil tussen beide waarden van τ is op de uitkomst van de berekening van de toegevoerde energie niet van grote invloed.) Het temperatuurverloop dat daaruit kon worden afgeleid, verschilde aanzienlijk van het door de Russen gepresenteerde verloop. Zo zou volgens onze uitkomsten reeds om 1 h 23.44 de smelttemperatuur (3100 K) zijn bereikt. In de Sovjet-simulatie daarentegen is de temperatuur na de eerste excursie ten hoogste 2100 K. De reactiviteitsbijdrage van het Doppler-effect is op het genoemde tijdstip volgens onze berekening 0,031 en de maximale reactiviteitsverhoging 0,016. Dat is meer dan de dampbelreactiviteit bij een dampbelfractie 100% indien de lek meebeschouwd wordt (zie hieronder). Volgens de Sovjet-simulatie zou de dampbelfractie echter maar met 20% zijn toegenomen.

Wij moeten derhalve concluderen dat de Sovjet-simulatie niet consistent is: de temperatuur past niet bij het opgewekte vermogen. Ook klopt de toename van de dampbelfractie niet met de reactiviteitstoename. De hoge Doppler-reactiviteit zou de excursie bij een veel lagere temperatuur hebben beëindigd.

De toestandsgrootheden in het puntmodel; de piekfactor

De toestandsgrootheden die men in het nuldimensionale model gebruikt, moeten uiteraard worden verkregen door op een geschikte manier over de ruimte te middelen. Uit de storingstheorie blijkt dat de reactiviteiten goed berekend worden indien de toestandgrootheden

worden 'gewogen' met het kwadraat van het lokale vermogen.

Wanneer de Doppler-reactiviteit gelijk is aan de dampbelreactiviteit, krijgt men voor een kubische homogene reactor een piekfactor (verhouding tussen maximum en gemiddelde waarde) voor temperatuur en vermogen van 1,64. Hierbovenop komt nog een lokale inhomogeniteit van 1,1 voor de splijtstofpennen aan de rand van een bundel en ca. 1,2-1,3 voor nieuwe bundels. Een totale piekfactor van 2,0 lijkt dan ook een redelijke waarde. Men moet echter bedenken dat deze waarde slechts zal gelden voor een relatief klein aantal pennen, te klein om het ongeluk te hebben veroorzaakt.

De berekening wordt gecompliceerder wanneer er splijtstof smelt. Warmtetoevoer leidt dan niet tot een hogere temperatuur, waardoor er een belangrijke niet-lineairiteit geïntroduceerd wordt en gemiddelde waarden moeilijker te bepalen zijn.

Lekeffecten

Eén van de vragen die opkomen is in hoeverre de reactor zich als één geheel gedragen heeft en of niet slechts een gedeelte van de reactor aan de excursie heeft deelgenomen. Volgens de reactortheorie geldt voor de vermenigvuldigingsfactor:

$$k = \frac{k_\infty}{1 + M^2B^2}.$$

Hierin is k_∞ de vermenigvuldigingsfactor van een oneindig grote reactor, M een materiaalconstante en B een geometrische factor. Voor een cilindervormige reactor, zoals die te Tsjernobyl bij benadering is, geldt:

$$B^2 = (2{,}405/R)^2 + (\pi/H)^2,$$

waarbij R de straal van de reactor is en H de hoogte. Voor R en H geldt dat deze inclusief de effectieve reflectordikte (0,5 m) genomen moeten worden.

Onder normale omstandigheden is $M^2B^2 = 0{,}02$. Neemt men aan dat het gedeelte van de reactor dat aan de excursie heeft deelgenomen een cylinder met halve straal en halve hoogte van de kern is, dan zal $M^2B^2 = 0{,}08$ zijn. Dit betekent dat, wil dit gedeelte kritiek blijven, k_∞ met 0,06 moet zijn toegenomen. Dit zou dus óók nog veroorzaakt moeten zijn door de dampbellen. Daar de bijdrage van de damp tòch al laag was, wordt de discrepantie tussen de Sovjet-simulatie en onze berekeningen, wanneer men aanneemt dat slechts een deel van de reactor aan de excursie heeft deelgenomen, nog groter.

Thermohydraulica

Als onderdeel van een gekoppeld neutronenfysisch-thermohydraulisch programma dat in ontwikkeling is, hebben wij een module voor het thermohydraulische gedrag van een splijtstofbundel geschreven. Na een aantal testberekeningen, waarbij o.a. het gedrag met een gelokaliseerde stapvormige warmtebron werd bekeken en de stationaire parameters werden vergeleken, is er een testberekening gemaakt om te zien hoe snel een splijtstofbundel leeg zou kunnen raken. Daarbij lieten wij het vermogen lineair met de tijd toenemen: het steeg in 1 s tot 100% en liep daarna door tot er een warmtebelasting van 2,5 MW/m^2 was bereikt. In axiale richting werd voor het vermogen een cosinusvormige verdeling aangenomen. Uit deze berekening blijkt dat het bovenste gedeelte van de kern na 2,5 s vrijwel geen water meer bevat. Deze tijd is van dezelfde orde van grootte als de duur van de vermogensexcursie.

* * *

De tot nu toe uitgevoerde berekeningen laten een onbevredigend gevoel achter. Er zijn meer vragen ontstaan dan er antwoorden te geven zijn. De positieve dampbelreactiviteit is te klein om alleen het ongeluk veroorzaakt te kunnen hebben. Het verschil $\Delta\varrho = 15 \times 10^{-3}$ tussen geheel volle en geheel lege kanalen, gevoegd bij een relatief grote Doppler-coëfficiënt, kan niet tot het explosieve uiteenspatten van de splijtstof geleid hebben, zoals dat door de Sovjets is gepostuleerd. De positieve temperatuurcoëfficiënt van de moderator heeft geen bijdrage aan de totale reactiviteit kunnen leveren. De bijdrage van de noodstopstaven is maximaal maar $\Delta\varrho = 5 \times 10^{-3}$. Deze waarde zou alleen kunnen zijn bereikt als er in de bovenste meter van de kern vrijwel geen vermogen opgewekt zou zijn; dit zou een bijzonder ongelukkige samenloop van omstandigheden zijn geweest. De gegevens die ter beschikking staan, o.a. ten aanzien van de positie van de regelstaven, laten echter een goede analyse niet toe, zodat het onderzoek in een impasse verkeert.

Nawoord

Er kan niet bestreden kan worden dat er een ongeluk heeft plaatsgehad. Wij hebben onderzocht in hoeverre de energie die nodig was om tot fragmentatie te komen, significant lager is dan de door de Sovjets opgegeven waarde van 1,2 MJ per kg splijtstof. De experimenten die in de Power burst facility in de VS zijn uitgevoerd, bevestigen deze waarde echter. Wel moet daarbij worden opgemerkt dat bij die experimenten de invloed van de versplijting maar zeer beperkt is onderzocht en dat plutoniumsplijtingen aan de rand van de splijtstof de waarde kunnen verlagen; ver opgebrande elementen zullen zeker een belangrijk lager vermogen hebben dan nieuwe elementen, maar die zijn niet bepalend geweest voor het ongeluk. Een belangrijke bron van energie blijft de exotherme zirconium-waterreactie van de splijtstofbekleding en mogelijk de drukbuis.

Een aannemelijk scenario lijkt het volgende te zijn: Door een reactiviteitsexcursie wordt de splijtstofbekleding in een groot aantal kanalen verwarmd tot bij het smeltpunt (2100 K). Door de stralingswarmte en mogelijk door direct contact met de splijtstofbuizen zullen die gedeelten van de drukbuis die niet met het grafiet in contact staan, sterk in temperatuur stijgen, totdat ze zó verweekt zijn dat ze bezwijken. Daar dit tegelijk of bijna tegelijk met een groot aantal pijpen gebeurt zal de druk van het insluitsysteem sterk oplopen, totdat de bovenste afsluitplaat opgetild wordt en de pijpen afbreken. Door de zirconium-waterreactie van de drukbuizen zullen deze óók in temperatuur stijgen en hun warmte aan het grafiet afgeven. Door de grote tijdconstante van het grafiet kan dat aan de buitenkant al gauw een temperatuur van 2000 K bereiken en na het indringen van zuurstof ontbranden. De bij de zirconium-waterreactie vrijkomende waterstof kan voldoende geweest zijn om na menging met zuurstof de tweede explosie te hebben veroorzaakt. De eerste is het gevolg geweest van de reactiviteitsexcursie.

Kernenergie of kolen, een kernvraag?

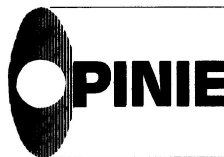
Een 'Opinie'; het woord plaatst mij als arts die tegen een patiënt zegt: 'Het spijt me, maar het is beter voor u als wij uw hoofd eraf halen'. En als antwoord krijgt: 'Als u denkt dat dat het beste is ...'

Kernenergie, al dan niet uitbreiden: daar heb ik geen 'juist' antwoord op. U moet het doen met de beoordeling van een fysicus op grond van zijn rangschikking van de feiten. Daarbij ga ik uit van de realiteit van een samenleving waarin comfort en onmiddellijke beschikbaarheid van energie voorop staan. Waar aan de andere kant een onbehaaglijk gevoel over de gevolgen van b.v. overmatig energieverbruik gestalte krijgt in latent aanwezige angsten, welke zich met name uiten in verzet tegen alles wat met 'kern' te maken heeft, dus ook kernenergie.

Dat onbehaaglijke gevoel is natuurlijk ook niet geheel misplaatst. Kernsplijting brengt risico's met zich mee: proliferatie, kwetsbaarheid voor terrorisme en bij oorlog, radioactieve uitstoot bij kleine ongelukken en rampen bij de zeer zeldzaam voorkomende grote. De opslag van radioactief afval brengt onzekerheden met zich mee en opwerking van splijtingsmateriaal is ook geen probleemloze techniek gebleken. De energievoorraad in splijtingsmateriaal is bovendien beperkt, zeker zolang kweekreactoren nog geen volledig beproefd concept vormen.

Maar ook het gebruik van fossiele brandstoffen heeft gevolgen: allereerst de onvermijdelijke stijging van het atmosferische CO_2-gehalte, hetwelk een mondiale klimaatverandering teweeg kan brengen. Daarnaast vormen de stikstofoxiden en bij kolen de zwavel- en vliegasproblemen aanzienlijke risico's op milieutechnisch gebied. De laatste zijn vermoedelijk voor een groot deel te beperken door zorgvuldige beheersing van de vlamtemperatuur, door zwavelbinding en door elektrostatische stofvangers. De stijging van het CO_2-gehalte blijft en is alleen terug te dringen door rendementsverbetering en energiebesparing, ook in andere sectoren dan de elektriciteitsproductie.

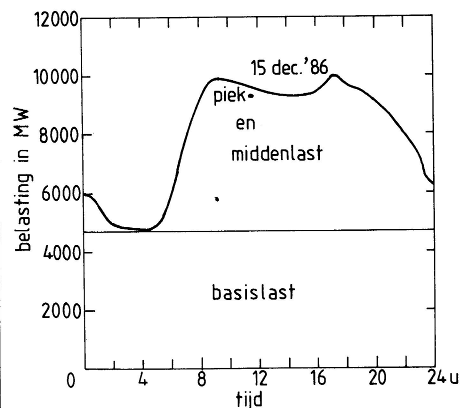
De samenleving gaat uit van onmiddellijke beschikbaarheid van elektrische energie, ongeacht de vraag op het desbetreffende ogenblik. De producenten hebben de verplichting zorg te dragen voor levering volgens zo reëel mogelijke prognoses en voor een aanvaardbare prijs. Die prognoses zijn dat het verbruik (in 1985 ruim 60 TWh) met ruim 1% per jaar zal toenemen. De behoefte aan nieuwe en vervangende centrales ligt de eerste decennia vooral bij basislastcentrales, dat zijn centrales die vrijwel continu kunnen werken om de zgn. basislast op te vangen (zie de figuur). Een lage prijs is daarbij het belangrijkst, hetgeen gezien recente fluctuaties in koers en olieprijs en de daaraan gekoppelde prijs van aardgas, de keus beperkt tussen kolen en kernsplijting. Op lange termijn kan kernfusie een aantrekkelijk alternatief zijn voor kernsplijting, met vermoedelijk aanzienlijk minder risico's. Zolang de gasprijs gekoppeld is aan de olieprijs, is gas voor basislastopwekking te duur; ontkoppeling van deze prijzen ligt politiek niet goed. Middenlast- en piekvermogen worden met behulp van gas geproduceerd; daarbij is een goed tot zeer goed rendement bereikbaar met toch korte opstarttijden.



Bij een aan de olieprijs gekoppelde gasprijs kan het economisch voordelig zijn om m.b.v. ondergrondse energie-accumulators de verschillen in dag/nacht-verbruik op te vangen en daarmee de behoefte aan piekcentrales te verminderen. Energieaccumulatie kan ook van belang zijn voor de inpassing van een groeiende bijdrage van zgn. zelfopwekkers, op dit moment vooral afkomstig van warmte/kracht-installaties en windenergie. Bij zelfopwekkers kan de levering aan het openbare net niet worden gegarandeerd, en deze kunnen dus niet dienen als vervanging van centrales voor basislastvermogen.

Gezien milieugevolgen, rendement en snelle inzetbaarheid is gas de meest aantrekkelijke energiedrager. Als apolitieke realist vraag je je dan wel af, waarom er gas uitgevoerd en kolen ingevoerd moeten worden, zeker zolang de voorraad gas voldoende is. Op langere termijn is het gebruik van kolen onvermijdelijk, gezien de voorraadproblematiek.

Al met al zal de behoefte aan basislastvermogen vermoedelijk niet verminderen. Integendeel, optimaal gebruik van brandstoffen vraagt om maximale inzet. Zelfs bij gelijkblijvend of licht afnemend gebruik staat de vraag: 'kernenergie of kolen', zolang gas niet 'mag', onverkort overeind. De keuze is derhalve een afweging van de risico's van de beide alternatieven. Voor de Nederlandse situatie, waar bovengrondse lokaties ver van bevolkingscentra niet mogelijk zijn, heb ik een lichte voorkeur voor uitbreiding en vervanging met kolen-centrales. Dit gekoppeld met een intensivering van onderzoek naar nieuwe verbrandingsmethoden en kolenvergassing en verbetering van methoden om de uitstoot van vliegas en zwavel verder in te perken. Daarbij is al veel bereikt bij moderne met kolen gestookte centrales, zoals de centrale Amer-8.



Ik besef met deze keuze t.o.v. het door de elektriciteitsproducenten voorgestelde scenario (1/3 kernenergie, 1/3 kolen, 1/3 gas) een 20% grotere vorming van CO_2 te veroorzaken. Deze toename valt echter in het niet bij de beperkingen die op andere terreinen mogelijk zijn, als daar de politieke bereidheid voor aanwezig is. Dit brengt mij tot een verlegging van de keus tussen kernenergie en kolen naar een keus voor energiebesparing en voor verhoging van het rendement.

Verhoging van rendement betekent misschien versnelde afschrijving van verouderde centrales. Het betekent ook en vooral rendementsverbetering bij ruimteverwarming en bij industrieel gebruik. Voor energiebesparing zou geen instrument te klein moeten zijn, als men de CO_2- en zure-regenproblemen politiek werkelijk serieus wil nemen. Allereerst een hoge prijs; geen onnodige verlaging van de aardgasprijs en de daarvan afgeleide elektriciteitsprijs. Niet onmiddellijk capituleren voor de eerste reacties als 'uitpersen van de armen', maar daar creatieve oplossingen voor vinden in de vorm van b.v. prijscompensaties. Ook bij de industrie zou men moeten streven naar een prijs- en subsidiebeleid dat investeren in industrieën die door arbeid en intellect een hoge toegevoegde waarde hebben, stimuleert. Nederland is met zijn hoge bevolkingsdichtheid óók niet de optima-

le lokatie voor energie-intensieve bulkindustrie, zoals een aluminium-industrie die een belangrijk deel van de in Nederland met kernenergie opgewekte energie voor een zeer lage prijs afneemt. Het autogebruik terugdringen, eveneens door prijsvorming, is een evidente weg.

Als woord is CO_2 minder geschikt, als begrip eigenlijk meer dan 'kern', om de latente angsten voor de onzekere gevolgen van weinig zorgvuldig omspringen met hulpbronnen vorm te geven. Een brede maatschappelijke discussie over energieverbruik algemeen, met zicht op alle risico's, de prijs voor onzorgvuldig gebruik, de moeilijkheid om lange-termijneffecten economisch te vertalen en daarmee werkelijk maatschappelijk bespreekbaar te maken, zou meer op zijn plaats zijn dan een geïsoleerde discussie over kernenergie-inzet bij elektriciteitsopwekking.

Terugkerend naar de beperkte vraagstelling: uitbreiden met kernenergie of kolen, herhaal ik mijn voorkeur voor kolen en zo mogelijk gas met een pleidooi voor sterke vergroting van onderzoek naar methoden van verbranding en vergassing, energie-accumulatie, inzet van stromingsbronnen, gepaard gaande met een politieke wil om de gehele omvang van het energieverbruik terug te dringen. Onderzoek, gericht op het realiseren van alternatieven op lange termijn, zoals kernfusie, moet met kracht worden voortgezet, bij voorkeur in internationaal verband. Het hoofd eraf? Eerst scheren!

D.C. Schram

Prof. dr. ir. D.C. Schram, sedert 1972 hoogleraar in de algemene natuurkunde aan de Technische Universiteit Eindhoven, was van 1963 tot 1972 verbonden aan het FOM-Instituut voor plasmafysica (Rijnhuizen) te Nieuwegein. Nadien werkte hij op het MIT (Boston, Mass.) enige tijd mee aan het Alcator-project en onlangs te Culham (U.K.) aan JET.

Een Diesel-motor, werkend met kernenergie

J. Kistemaker

Reeds meer dan tien jaren wordt in Nederland gewerkt aan een volkomen nieuwe benadering van kernsplijtingsenergie. Als voorlopers zou men kunnen zien de kernvoortstuwingsmotoren voor interplanetaire reizen van de NASA uit de jaren '60 en in zekere zin ook de vroege suspensiereactor van prof. J. Went, waaraan bij de KEMA is gewerkt. De benadering in dit artikel is gebaseerd op een homogeen 'nucleair' gasmengsel dat op een zo hoge temperatuur functioneert dat het een goed elektrisch geleidingsvermogen bezit. Als zodanig is het geschikt om op magneto-hydrodynamische wijze te worden gemanipuleerd in een Diesel-motor. Een interessante kruising tussen 'fission'- en 'fusion'-technologie.

Van houtvuur tot kerncentrale

Tot de grootste uitvindingen in de prehistorie der mensheid behoren de kunst om zelf vuur te maken, het pottenbakken, en het koken van voedsel in water. Hierdoor werd de eerste bevolkingsexplosie in het neolithicum mogelijk en ontstonden de eerste gespecialiseerde woongemeenschappen. Via diverse avonturen, zoals die van de Chinese raketten en van de uitvinding van het buskruit in Europa, belanden we in het 18e eeuwse Engeland. Uit diverse primitieve voorlopers ontstond daar de stoommachine van James Watt, een zelfregelende machine die met gebruikmaking van de drie fundamentele prehistorische innovaties leidde tot een nieuw tijdperk in de menselijke cultuur, de industriële revolutie. Het menselijk kunnen werd verduizendvoudigd door de energie aan te boren die is opgeslagen in het systeem 'kolen + lucht'. Daardoor is onze moderne samenleving mogelijk geworden.

De 19e eeuw was de eeuw van het optimisme. De ene uitvinding volgde op de andere. Faraday's inductiewetten werden in 1862 vertaald in de elektromotor van Gramme. Met behulp van stoommachines werden dynamo's aangedreven die elektrische stroom begonnen te leveren, en in 1880 reed de eerste elektrische tram! Langs een koperdraadje werd energie getransporteerd naar elke plaats van huis of stad. De gloeilamp deed zijn intrede. In diezelfde jaren experimenteerden Benz en Diesel met de eerste verbrandingsmotoren met vloeibare brandstof: olie, schoner en gemakkelijker te vervoeren dan kolen! De verbrandingsmotor en de elektromotor zijn de meest innoverende uitvindingen in onze technische cultuurgeschiedenis. Auto, motorschip en vliegtuig zijn hierop gebaseerd. Verbrandingstemperaturen van 2000 à 3000 K waren nodig voor bevrijding van chemische energie. Deze temperaturen bepaalden het rendement en de milieuvervuiling.

Bij gebruik van deze hoge temperaturen kwam ook het corrosiemonster weer opduiken. Keramiekbekleding in verbrandingskamers van automotoren is het moderne antwoord hierop. Ook bij straalmotoren voor vliegtuigen en bij ruimtevaartraketten is corrosie de grootste vijand. Het oude pottenbakkersprobleem duikt weer op.

In deze ingenieuze, maar oerconservatieve wereld van de 20e eeuwse mens trad rond 1950 plotseling de kernenergie binnen. Het antwoord van onze ingenieurs bestond uit een oerconservatieve benadering voor conversie van kernenergie in elektriciteit: de licht-water-reactor (LWR). Het evenbeeld van de stoommachine van Watt: groot, zwaar en met veel staal. De ontwikkeling van fusiemachines gaat dezelfde kant op. Steeds grotere tokamaks worden nodig geacht om door kernversmelting voldoende energie uit waterstof vrij te maken. In de op kernsplijting gebaseerde LWR werkt men met vaste 'splijtstof' gekoeld door water. In de fusiemachines moet een zeer ijl plasma (10^{14} ionen/cm^3), dat zich op 100 miljoen graden bevindt, m.b.v. sterke magneetvelden op afstand van de wanden worden gehouden. Verhitten en stabiliseren van deze plasma's is een moeilijke zaak.

De oorzaak voor de grote afmetingen van beide soorten energieconversiemachines is zeer verschillend.
In de huidige generaties LWR's en HTGR's (hoge-temperatuurreactoren met gaskoeling) vormt het feit dat de kernenergie vrijkomt in vaste splijtstofelementen (U_2O_3), een fundamentele begrenzing voor de energiedichtheid



Prof. dr. J. Kistemaker (70) studeerde natuurkunde aan de Rijksuniversiteit Leiden, waar hij in 1945 promoveerde bij prof. dr. H.A. Kramers n.a.v. een experimenteel onderzoek over de toestandsvergelijking van helium. Na een jaar bij Niels Bohr trad hij als eerste in dienst van de Stichting FOM (1947) en werkte daar aan isotopenscheiding, gasontladingen, massaspectrometrie en atoom- en molecuulfysica. Zijn naam is verbonden aan het Nederlandse ultracentrifuge-project. Prof. Kistemaker was bijzonder hoogleraar namens Teylers Stichting aan de RUL. In 1982 trad hij af als directeur van het FOM-Instituut AMOLF in Amsterdam wegens het bereiken van de 65-jarige leeftijd, maar bleef daaraan verbonden als adviseur.

daarin. Die splijtstof mag niet smelten. Dit heeft tot gevolg dat men 100 ton splijtstof nodig heeft (3% U235) om een vermogen van 3000 MW thermisch in continu bedrijf te produceren. De temperatuur waarop energieconversie plaatsvindt is laag: 500 à 1000 K.

Om dezelfde energie in tokamak-fusieplasma's op te wekken, zijn volumina nodig van 10^3 à $10^4 m^3$ wegens de geringe dichtheid van het plasma en de te zware wandbelasting in *kleine* fusiereactoren. Deze enorme volumina moeten met magneetvelden van de orde van 5 tesla gevuld worden om de hete plasma's van de wand te houden. Er is nl. geen isolerende, beschermende gaslaag bij de wand aanwezig. Wandcorrosie is in tokamak-reactoren een fundamenteel probleem, naast de geringe dichtheid van het plasma en het ontstekingsprobleem.

Bovenstaande overwegingen alsook de enorme kostprijs van dit soort installaties, en rampen zoals die van Tsjernobyl en Three Miles Island, doen sommige fysici naarstig zoeken naar een 'beter' type kernreactor. Reële probleemstellingen zijn:

- Hoe kun je hoogwaardige kernenergie omzetten in elektriciteit zonder de tussenstap van het kokende water (J. Watt!)?
- Hoe voorkom je wandcorrosie als we afstappen van vaste splijtstof en bij zeer hoge temperaturen (10 000 K) met gas gaan werken?
- Hoe kom je tot kleinere opwekkingseenheden (van 50 of 100 MW thermisch), die als modulen in serie in een reactor-fabriek gebouwd zouden kunnen worden? Dat zou de veiligheid verhogen en de prijs doen zakken naar ca. 300 miljoen gulden per reactor.
- Hoe maak je een kernreactor die inherent veilig is, die geen 'melt down' kan vertonen en niet nucleair kan ontploffen.

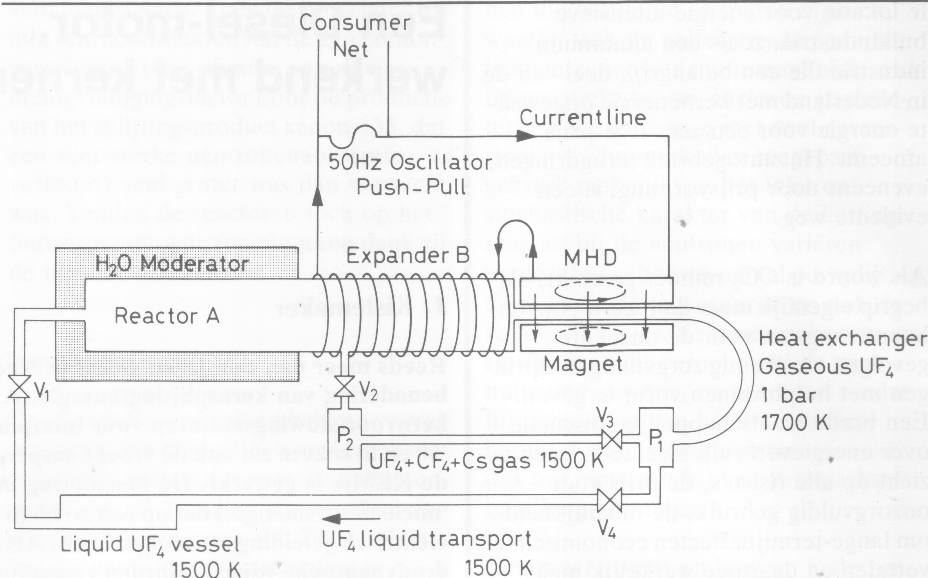


Fig. 1. Schematische weergave van een elektromagnetisch inductief werkende Diesel-generator voor elektriciteitsproductie met als energiebron een gaskernreactor. De reactor-kamer A (2 à 3 m^3) bevat een nucleair-kritische hoeveelheid UF_4-gas (met 30% U-235) in CF_4 als 'drager'; bij compressie 50 à 100 bar, 10 000 K. Door de hoge temperatuur is het gas elektrisch geleidend en kan daardoor met een magnetische zuiger (5 tesla) worden samengedrukt. De magnetische energie per m^3 is 10 Megajoule. Bij een 'toerental' van 50 s^{-1} wordt gedurende elke compressie 0,8 M J · m^{-3} splijtingsenergie gegenereerd door 40 kg UF_4-gas.
In de expansiefase wordt het hete uitlaatgas (6000 K) verder van zijn energie ontdaan d.m.v. magnetohydrodynamische extractie van energie.
Het afgekoelde gas wordt door twee elektromagnetische, cyclonale (gas)pompen P_1 en P_2 en grafietkleppen V_1 t.m. V_4 cyclisch naar de reactor teruggevoerd.
Het push-pull elektro-magnetische inductiesysteem moet geheel supergeleidend zijn om de ca. 30 Megajoule magnetische energie 50 maal per seconde tussen de beide spoelen te laten oscilleren.

Dit soort probleemstellingen vereist veel inzicht in de wirwar van processen en ook en vooral veel innovatief denkvermogen. De klassieke werkmethode van de ingenieur, die stap voor stap het bestaande verbetert, zal naar onze mening geen echte oplossing brengen. Daarom lanceren wij hier het idee van de nucleaire Diesel-motor die als 'brandstof' verrijkt UF_4 met CF_4-gas gebruikt. Een typisch fysische 'wensdroom', die volgens de klassieke ingenieur niet 'kan'; de tijd zal het leren.

In *fig. 1* zien wij een blokdiagram van een generator die een direktere omzetting van kernenergie in elektriciteit beoogt. Naar analogie van de verbrandingsmotor is er ook hier een compressiekamer A en een expansiekamer B. De samendrukking van het gasmengsel gebeurt ook hier m.b.v. een zuiger. Als zodanig fungeert niet de primitieve mechanische 'piston' aan een krukas met omzetting in een draaibeweging via gelagerde doorvoeren, maar een magnetische, verplaatsbare wand die een goed geleidend medium (plasma) kan comprimeren, zoals in de fusietechnologie gebruikelijk is. Een plasmadruk van 100 bar komt overeen met 5 Tesla. Met de doorbraak die thans in de wereld van de supergeleiders plaatsvindt (CuBaLa-oxiden), wordt dit een 'fluitje van een cent', mits we een goed geleidend

Nucleaire Diesel-generator voor produktie van elektriciteit (zie fig. 1).

V_1 = volume ($A + B$)		6 m^3
V_2 = volume A		2 m^3
Wandtemperatuur	van A	1500 K
idem	van B	1800 K
p_1		10 bar
T_1 (gem. temp. van het gas)		6000 K
Materiaal		80 mol UF_4 + 40 mol (CF_4 + Cs)gas
		60 mol UF_4 condensaat op wand van A.
Isotopische samenstelling		70% U-238 en 30% U-235

De cyclus wordt doorlopen in 20 ms, waarbij via splijting een energie van 8×10^5 J wordt geproduceerd. Het thermisch vermogen van het cyclische proces bedraagt dus 40 MW. Daarnaast is er een base-load van 40 MWth nodig.

Warmteproduktie	Elektriciteitsproduktie
40 MW th. uit base load	20 MW elektr. uit Diesel-cyclus
40 MW th. uit Diesel-cyclus	15 MW elektr. uit MHD-kanaal
	15 MW elektr. via gasturbine
80 MW th. totaal	50 MW elektr. totaal

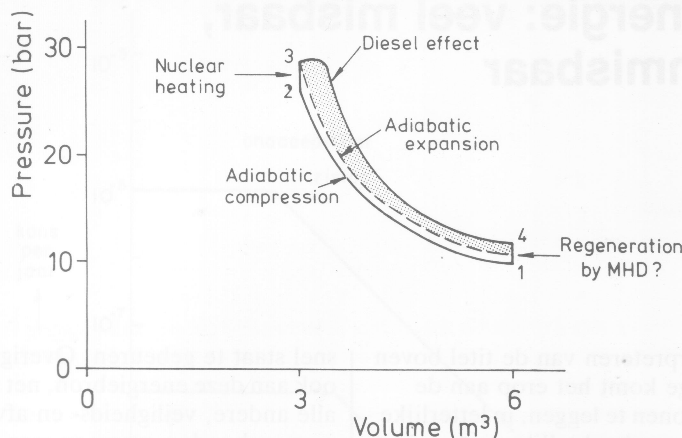


Fig. 2. *p,V*-diagram voor een nucleaire Dieselmotor. De aangegeven volumina en drukken zijn uitsluitend bedoeld als oriëntatie. De lus wordt op sinusoïdale wijze doorlopen in 20 milliseconde.

plasma hebben. Daarvoor is een energieproducerend gas nodig op zo hoge temperatuur dat het geleidend is. Kan dat?

Neem een nucleair gasmengsel, in dit geval $UF_4 + CF_4$ met 30% U-235, en comprimeer dat met een factor twee of drie in een 50 Hz Diesel-motor; zie *fig. 2*. In de gecomprimeerde toestand (het traject van 2 naar 3 in fig. 2) is het gas sterk overkritisch en produceert in 5 ms een flinke dosis energie t.g.v. kernsplijting. De sterke druktoename duwt de magnetische zuiger terug naar toestand 4. De geproduceerde energie wordt ten dele langs inductieve weg direkt teruggekoppeld naar het L,C-systeem dat beurtelings zorgt voor de bekrachtiging van de compressiespoel en voor de bekrachtiging van de MHD magneet. Deze laatste moet de energie halen uit de 'uitlaat'-gassen van deze Diesel-motorgenerator (4→1). Het Diesel-karakter zit in de 'nalevering' van energie als men van 3 naar 4 gaat. Deze kan in een snel reactorsysteem zeer aanzienlijk zijn en vindt zijn oorzaak in de leverantie van 'prompte' neutronen in punt 3. Deze kan niet op commando worden gestopt en blaast in feite het oppervlak van de *p,V*-kringloop op. Het 'uitlaat'-probleem van deze Diesel-motor moet uiteraard worden opgelost via MHD, warmtewisselaars en elektromagnetische centrifugaalpompen in een hermetisch gesloten systeem, en wel zonder mechanisch draaiende delen. Misschien kunnen wij nog wat 'know-how' uit de vloeibaar-natriumtechnologie gebruiken.

Aan de hand van het in het bovenste vak van het kader gepresenteerde voorbeeld kan worden getoond welke mogelijkheden er zijn. Om de generator op de geschetste wijze te laten werken, is er een zekere 'base-load' noodzakelijk, die zich reflecteert in het volgende nucleaire vermogensverloop langs de 'Carnot-lus': Q_1 = 30 MWth, Q_2 = 60 MWth, Q_3 = 210 MWth. Bovendien namen wij 30% extra energie voor het Diesel-effect van 3 naar 4. Dit leidt tot het in het onderste vak van het kader afgedrukte staatje. De thermische belasting van de wanden is 2,5 MW m^{-2}. De druk in punt 3 is 54 bar en de conversiefactor 0,67. Inductie plus MHD leveren direct aan het net 35 MW elektr. (50 Hz). De gasturbine draait op het heliumgas van hoge druk dat de wanden koelt.

Onderzoek

Voor de realisatie van een dergelijke Diesel-motorgenerator moet een zevental problemen worden bestudeerd en tot oplossing gebracht. Al sinds 1974 werken wij daaraan.

Allereerst het nucleaire aspect. Betrokken op fig. 2 wordt de energievergelijking:

$$2{,}5\, n_{gas}\, R(T_3 - T_2) = Q_2 \int_{t_2}^{t_3} \exp(t/\tau)\mathrm{d}t\ .$$

In woorden:
de toename van de warmte-inhoud = de nucleaire energieproduktie in $t_3 - t_2$ = 5 ms. Dit vereist een reactortijdsconstante τ van 5 ms. De realisatie hiervan heeft onze aandacht[2].

Indien de composietwand bedekt is met een laag koolstof (1 cm), stelt zich bij elke temperatuur (1800 K) en druk (25 bar) een evenwicht in tussen het gasmengsel (UF_n, CF_m, Cs) en de *C* van de wand. Temperatuur- en drukverschillen moeten voldoende beheerst worden, evenals de F- en de C-balans. De wand is een deel van het chemische systeem. Hieraan hebben we al veel werk gedaan[3].

Het elektrisch geleidingsvermogen η wordt zeer beperkt door de aanwezigheid van fluor in het gas, dat negatieve ionen vormt. Berekeningen leren dat men boven 6000 K moet gaan om $\eta < 10^{-4}$ Ωm te doen zijn. De indringdiepte *d* van een wisselend magneetveld is dan 1 à 10 cm voor $\Delta t \approx 1$ ms. Hieraan wordt gewerkt met steun van de Stichting voor de Technische Wetenschappen[5].

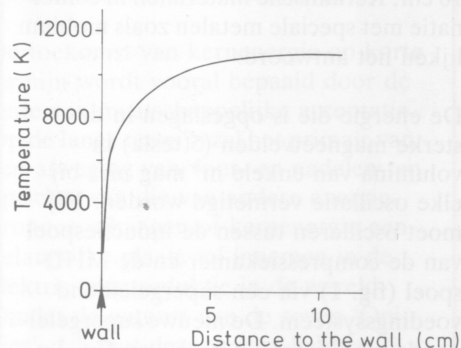


Fig. 3. Temperatuurverdeling binnen een gaskernreactor bij aangenomen druk (25 bar) en vermogen (80 MW th). Onder deze omstandigheden bevindt zich tegen de wand een optisch dichte laag die als stralingsschild fungeert.

Indien de druk van het gas voldoend hoog is (25 bar), is bij de wand van het reactorvat (T = 1500 K) een gasdeken aanwezig die de stralingswarmte verhindert direct de wand te bereiken. Dan geldt:

$(\partial T/\partial r)_{wand} = (KT^4 + q\lambda)^{-1} \times$ (vermogen/wandoppervlak).

Hierin is KT^4 de stralingsterm en $q\lambda$ de kinetische warmtegeleidingsterm; q is de convectiefactor en λ het laminair warmtegeleidingsvermogen. Voor 'onze' reactor is $(\partial T/\partial r)_w \approx 5 \cdot 10^6$ K.m^{-1}, wat betekent dat op enkele mm van de wand $T \geqq 6000$ K is; zie *fig. 3*.

Behalve de in fig. 1 aangeduide hoofdelementen van de splijtstofcyclus staat men voor de vraag hoe nieuwe splijtstof toe en oude af te voeren. Wij hebben daar reeds enige aandacht aan besteed (F. Kelling), maar zouden de voorkeur geven aan gesloten modulen, met ingebouwde splijtstofvoorraad. Om zo'n module op 80 MW thermisch gedurende 3000 uur te laten werken, is een voorraad van 50 kg UF_4 verdeeld over tien reservoirs van elk één liter voldoende. Daarna moet de module terug naar de fabriek en vervangen worden door een verse.

De wand van de reactor moet aan de binnenzijde bedekt worden met tegels van pyrolytisch grafiet, bevestigd op gasdicht en vuurvast materiaal voorzien van koelleidingen voor heliumgas onder hoge druk. Eisen: 1800 K oppervlaktetemperatuur en bestand tegen een temperatuurgradiënt van 150 K.cm^{-1} bij een neutronenflux van 10^{16}, totale dikte

10 cm. Keramische materialen in combinatie met speciale metalen zoals niobium lijken het antwoord.

De energie die is opgeslagen in de sterke magneetvelden (5 tesla) in volumina van enkele m^3 mag niet bij elke oscillatie vernietigd worden. Hij moet oscilleren tussen de inductiespoel van de compressiekamer en de MHD-spoel (fig. 1) via een supergeleidend voedingssysteem. De nieuwe supergeleidende materialen op basis van Cu, La, Ba-oxide, die goed werken bij 77 K en hoger, zullen deze belangrijke toepassing mogelijk maken.

Ten slotte enkele veiligheidsaspecten. In de reactor kan geen hogere druk ontstaan dan het aangelegde magneetveld kan dragen. 'Meltdown' is onmogelijk, daar de hoeveelheid splijtstof minimaal is (een factor 1000 minder dan in een klassieke reactor). Als de koeling van de moderator (H_2O) uitvalt, verdampt het water en stopt de reactor.

De bouw in modulen betekent een kostprijs per reactor van ca. 300×10^6 gulden en top-vakmanschap, vergelijkbaar met de serieproductie van grote passagiersvliegtuigen. De hoeveelheden splijtstof en radioactiviteit – zoals gezegd, een factor 1000 minder dan in klassieke reactoren – worden niet meer bij de 'klant' behandeld. In centrale opwerkingsfabrieken kunnen fysische scheidingsmethoden worden toegepast i.p.v. de volumineuze natte chemie.

Samenvattend, een ideaal project om aan mee te werken in een land waar innovatie hoog in het vaandel staat en waar samenwerking tussen de Technische Universiteiten en 'de industrie' met de mond als hoogste wijsheid beleden wordt. Nog is onze Nederlandse kennis uniek.

Referenties

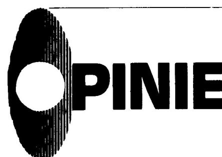
1. J. Kistemaker, NTvN **A44** (1), 1978.
2. H. van Dam en J.E. Hoogenboom, Nuclear Technology **63** (1983) 359.
3. W. Boersma-Klein, F. Kelling, J. Kistemaker en R.J. Heyboer, J. Nuclear Materials **130** (1985) 418.
4. Paul Chu, Science Magazine, 30 Jan. 1987.
5. J. Kistemaker, STW-project FAM66.0933.

Kernenergie: veel misbaar, wel onmisbaar

Bij het interpreteren van de titel boven deze bijdrage komt het erop aan de juiste klemtonen te leggen, in letterlijke zin. Ook in overdrachtelijke zin worden in verband met kernenergie nogal wat zaken verkeerd beklemtoond, wat soms aanleiding geeft tot kouwe drukte of tot nodeloos misbaar. Wat eèn bespreken van kernenergie zo moeilijk maakt, is in de eerste plaats de uitgebreidheid van het onderwerp.

De fysica van kernfissie: een uitzonderlijke meevaller

Het bestaan van spontane kernfissie is grotendeels aan de aandacht van de fysici uit de jaren dertig voorbijgegaan.



Geïnduceerde fissie werd wel correct geïnterpreteerd in 1938. Nauwelijks vier jaar later, in 1942, wordt aangetoond dat een geïnduceerde fissie zichzelf kan op gang houden door tussenkomst van een 'nucleaire katalysator', met name het neutron. Terugblikkend moet men vaststellen dat het verwezenlijken van een zichzelf onderhoudende fissie-reactie mogelijk is geweest dank zij een eerder uitzonderlijk samengaan van gunstige fysische factoren.

Kernfusie: een stuk moeilijker

Met kernfusie liggen de zaken helemaal anders. De moeilijkheidsgraad is hier vele grootte-orden hoger: de drempelenergie voor de reactie ligt bij enkele miljoenen graad en de werkzame doorsneden zijn klein. Praktische moeilijkheden hebben zich opgestapeld, zodat kernfusie totnogtoe de (te?) hoog gespannen verwachtingen niet heeft kunnen inlossen. Ook al slaagt men erin de fusie-reactie zelfstandig op gang te laten blijven, dan nog is dit enkel de eerste stap en moet men bovendien de technische en economische haalbaarheid aantonen.

Het valt niet te verwachten dat dit zo snel staat te gebeuren. Overigens zijn ook aan deze energiebron, net zoals aan alle andere, veiligheids- en afvalproblemen verbonden, waaraan men uiteraard nog weinig detail-aandacht heeft besteed.

Het wel en wee van kernenergie

De snelheid waarmee kernenergie (door kernfissie) een belangrijke plaats heeft ingenomen in de elektriciteitsproductie van de geïndustrialiseerde landen, is verbluffend. Een aantal factoren heeft daartoe bijgedragen: In de eerste plaats de betrekkelijk eenvoudige constructie van de waterreactoren. Vervolgens heeft de olieschok van 1973 een krachtige impuls gegeven. De tweede olieschok (van 1979) heeft indirect door de vertraagde of zelfs negatieve economische groei een remmend effect gehad op de ontwikkeling van kernenergie. Nochtans hebben de kernenergiecentrales die in de periode van, of kort na de olieschok van 1973 zijn besteld, in belangrijke mate bijgedragen tot de prijsdalingen van 1986.

In verband met het veilig gebruik van fissie-energie zijn twee effecten van groot belang: de grote hoeveelheid nawarmte die blijft vrijkomen na het stopzetten van de reactie (en nog moet worden afgevoerd), en de mogelijkheid van een toestand van 'prompte kriticiteit', waarbij de reactie niet meer in de hand kan worden gehouden. De ongevallen van Three Mile Island (TMI) en Tsjernobyl zijn respectievelijk een warmte-afvoer-ongeval en een kriticiteitsongeval.

Vooral het ongeval van Tsjernobyl heeft in West-Europa de twijfel omtrent het gebruik van kernenergie sterk doen toenemen. Hierbij speelt vooral de psychologische impact van een onbekend, onzichtbaar, ongrijpbaar en vooral onbegrepen gevaar een grote rol. Het dient echter duidelijk gesteld dat Tsjernobyl een geval apart is. De aard van ongeval was inherent aan het reactor-type en in het geval van waterreactoren kan een kriticiteits-ongeval van dergelijke omvang uitgesloten worden.

Anderzijds is TMI wel degelijk representatief voor het soort ongeval dat in de bestaande waterreactoren niet geheel kan worden uitgesloten, hoewel de waarschijnlijkheid zeer klein kan gemaakt worden. Statistisch is de kans kleiner dan 10^{-5} per reactor/jaar, maar in de praktijk moet men vooral door kwaliteitszorg en kwaliteitsborg zowel bij de bouw als in het bedrijf van de reactor dergelijke ongevallen uitsluiten.

Indien bij een waterreactor de mogelijkheid van een ernstig ongeval toch niet totaal kan worden uitgesloten, dan komt de nadruk vanzelf te liggen op het veiligheidsomhulsel. Dit (eventueel dubbele) omhulsel moet erop berekend zijn de gevolgen van een ernstig ongeval, met name de uitstoot van bepaalde klassen radioactieve stoffen zoals jodium en cesium, op te vangen en tot een aanvaard niveau terug te brengen.

Dit is de concrete les van TMI: door de aanwezigheid en het intact blijven van het veiligheidsomhulsel zijn er geen radiologische gevolgen geweest bij de bevolking.

Ook uit Tsjernobyl zal men heel wat belangrijke informatie kunnen opdoen i.v.m. het reële radiologische risico waarvoor onmiddellijk na het ongeval, zoals gebruikelijk, te hoge maximumwaarden zijn geschat.

Kernenergie: de relativiteit en de polarisatie

Energie in voldoende mate en voor iedereen is een essentieel element van onze samenleving. Hieraan zijn niet alleen economische maar ook sociale en culturele consequenties verbonden.

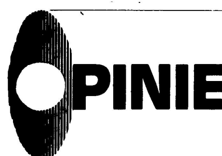
Ons leefpatroon, dat o.a. hoge bevolkingsconcentraties inhoudt, kan niet in stand gehouden worden zonder beroep te doen op kernenergie. Kernenergie wordt al te veel op een absolute wijze benaderd. Van deze energiebron zou geëist worden dat zij totaal veilig, totaal zonder nadelige of als nadelig beschouwde effecten is, en bovendien goedkoop. Ten aanzien van andere energiebronnen worden niet dezelfde absolute maatstaven gebruikt.

Een analyse van de relatieve voordelen van kernenergie brengt aan het licht dat de luchtverontreiniging ten gevolge van de uitstoot van centrales met fossiele brandstof verminderd is door overschakeling op kernenergie. Ook deze voordelen zijn grensoverschrijdend. Dit is nog tijdens de voorbije winter geïllustreerd toen in de strenge vorstperiode de oostenwind sterk verontreinigde en gezondheidsnadelige luchtlagen uit het Duitse Ruhrgebied over Nederland en België bracht.

Omtrent het onderwerp kernenergie is een evenwichtige discussie haast onmogelijk geworden door het ontstaan van een sterke polarisatie. Deze polarisatie moet verminderen. Het is duidelijk dat bij het gebruik van kernenergie het leerproces niet ten einde is. Anderzijds, wie ongenuanceerd tegen is, vergist zich wellicht van doelstelling.

De extrapolatie

Bij het voorspellen van wat te gebeuren staat, wordt (meestal impliciet) uitgegaan van een aantal premissen. Een eenvoudige vorm van voorspellen is de extrapolatie. Daarbij wordt ondersteld dat de uitgangsvoorwaarden constant blijven. Dit was het procédé, gevolgd in het rapport van 'De Club van Rome'. Destijds heeft het veel ophef gemaakt; nu wordt er bij gelegenheid nog naar verwezen, maar dan meestal ironiserend.



Hier wordt uitgegaan van de premisse dat we met zijn allen in de toekomst nog veel energie zullen wensen te gebruiken, liefst op een verstandige manier. Er is trouwens geen reden om ons dit te ontzeggen, ook niet aan de minst begunstigden onder ons. Energie moet dus niet nodeloos duur zijn of gemaakt worden. Het is ook duidelijk dat elektriciteit een erg gewilde energievorm of -drager is, die zijn aandeel in het totale energiepakket nog steeds opdrijft.

Fossiele brandstoffen moeten omzichtig gebruikt worden. Men kan wel pogen de zwavel- en stikstofoxyden te verwijderen, maar het koolstofdioxyde wordt nog altijd in de atmosfeer geloosd.

Duurzame energiebronnen zijn meestal weinig geschikt voor grootschalig of veralgemeend kleinschalig gebruik. Zij leveren ook slechts energie wanneer de omstandigheden gunstig zijn, niet wanneer wij het wensen.

Fusie-energie is, zoals gezegd, nog niet bruikbaar en dat zal wellicht nog een aantal decennia zo blijven.

De slotsom is duidelijk: op wereldschaal is fissie-energie onmisbaar. Recente economische studies in de Bondsrepubliek doen aan deze stelling geen afbreuk, al was het maar omdat zij uitgaan van een te enge studieruimte.

Aangezien fissie-energie enerzijds onmisbaar is en anderzijds bij het publiek onvoldoende vertrouwen geniet, moeten beide naar elkaar toe evolueren. De kernenergie-sector moet gaan werken volgens hoge, internationaal aanvaarde en verifieerbare normen bij de bouw en de werking van reactoren. Reactortypes met een grotere veiligheidsreserve moeten ontwikkeld worden. Meer aandacht moet besteed worden aan het veiligheidsomhulsel.

De informatie van het publiek moet dringend verbeterd worden en de desinformatie verdwijnen. Berichtgeving moet gericht zijn op informatie-in-context; in volle openheid, maar zonder sensatie of nodeloos misbaar en zonder gebruik van dubbele maatstaven.

Indien men in deze richting wil werken, kan kernenergie, samen met steenkool en andere fossiele brandstoffen en samen met duurzame energiebronnen, niet alleen een onmisbare maar ook een aanvaardbare en aanvaarde energiebron vormen.

De contestatie ging ervan uit dat instellingen moeten gecontesteerd worden. Dat geldt ook voor de contestatie wanneer zij een instituut geworden is.

S. Amelinckx en H. Ceulemans

Prof. dr. S. Amelinckx en prof. dr. H. Ceulemans zijn verbonden aan het Studiecentrum voor kernenergie te Mol (België), prof. Amelinckx als directeur-generaal.

De tokamak:

een weg naar de fusiereactor



Prof. dr. C.M. Braams (1925) studeerde natuurkunde aan de RU Utrecht en promoveerde in 1956 bij prof. dr. P.M. Endt op een kernspectroscopisch onderzoek. In 1959 werd hij directeur van het nieuw-opgerichte FOM-instituut voor Plasmafysica te Jutphaas (thans Nieuwegein). Begin 1987 trad hij terug uit deze functie en uit die van buitengewoon hoogleraar aan de RUU.



Prof. dr. F. Engelmann (55) studeerde natuurkunde aan de Technische Hochschule in München en promoveerde aldaar in 1956 op een onderzoek naar energietoestanden van elektronen in kristalroosters. In 1960 trad hij in dienst van de Europese Gemeenschappen (bij EURATOM). Hij werkte eerst in Frankrijk, daarna in Italië, en nu in Nederland en in Duitsland op het gebied van de theoretische plasmafysica. Zijn speciale belangstelling gaat uit naar kernfusie. Van 1965 tot 1975 was hij verbonden aan de Universiteit van Rome; sinds 1975 is hij buitengewoon hoogleraar aan de Rijksuniversiteit Utrecht.



Ir. H.Th. Klippel (1939) studeerde technische natuurkunde aan de TU Eindhoven, waar hij in 1967 de ingenieurstitel behaalde. Sedertdien is hij verbonden aan het ECN te Petten en heeft reactorfysisch werk verricht aan zowel splijtingsreactoren als fusiereactoren. Vanaf 1981 is hij projectleider Systeem- en Veiligheidsstudies Fusiereactoren en is als zodanig nauw betrokken bij het Europese fusietechnologieprogramma, de INTOR-studie en de NET-studie.
Ir. Klippel is lid van verschillende Europese werkgroepen en is lid van de commissie Thermonucleair onderzoek en Plasmafysica van FOM. Hij maakte o.a. deel uit van een Europese werkgroep die zich, in opdracht van de EG, verdiept heeft in de maatschappelijke aspecten van kernfusie, het onderwerp van zijn artikel.

Wie zoekt naar wegen om potentiële energie van kernkrachten om te zetten in andere, 'nuttige' vormen van energie, komt hier en daar voor een splitsing te staan waar hij een richting moet kiezen. In de volgende drie artikelen wordt één mogelijke weg geëxploreerd, die men vindt door te kiezen voor

- *kernfusie i.p.v. kernsplijting,*
- *de deuterium-tritiumreactie i.p.v. andere reacties tussen lichte kernen,*
- *magnetische opsluiting van de brandstof i.p.v. explosieve verbranding,*
- *'gesloten' of toroïdale i.p.v. 'open' magnetische systemen,*
- *de tokamak i.p.v. andere toroïdale systemen,*
- *produktie van elektriciteit i.p.v. een andere energiedrager.*

Eén en ander leidt, zoals in de drie artikelen wordt toegelicht, tot een model van een fusiereactor waarin een ringvormig deuterium-tritiumplasma is omgeven door achtereenvolgens

- *een vacuümwand die verontreinigingen buiten het plasma houdt,*
- *een kweekmantel waarin de reactieneutronen hun energie afstaan en met lithium reageren om tritium te produceren (de hier ontwikkelde warmte wordt via een koelmedium en warmtewisselaars naar een stoomgenerator gevoerd),*
- *een eerste afscherming om warmtedepositie van neutronen in de magneetspoelen (en daarmee tevens stralingsbeschadiging in supergeleiders en isolatoren) tegen te gaan,*
- *de spoelstellen voor het toroïdale en het poloïdale magnetische veld,*
- *een tweede, 'biologische' afscherming om de veiligheid van het bedienend personeel te waarborgen,*
- *een gasdichte omhulling om weglekkend tritium vast te houden.*

Het is in het bestek van deze artikelen niet mogelijk om interessante ontwikkelingen op andere lijnen van fusieonderzoek te beschrijven en de gemaakte keuzen te rechtvaardigen; de auteurs beperken zich tot de hoofdlijn, die erop gericht is om via de bouw van tokamak-testreactoren het onderzoekgebied van de fusie-technologie te ontsluiten.

De oriëntatie van het fusie-onderzoek is de laatste jaren onderwerp van diepgaande discussies geweest, die tot een brede overeenstemming over de tokamak-testreactor als primaire doelstelling voor de komende 10 à 20 jaar en tot concentratie van het grootste deel van het onderzoek op die lijn hebben geleid. Dit is gebaseerd op het vertrouwen dat een tritium-brandende tokamakreactor, ondanks de bezwaren die aan het gebruik van radioactieve brandstof en de produktie van neutronen verbonden zijn, zowel aan hoge veiligheidsnormen als aan redelijke economische criteria kan voldoen. Over deze maatschappelijke aspecten gaat het artikel van H.Th. Klippel. De gekozen strategie is mede gebaseerd op vertrouwen in de mogelijkheid om binnen het kader van de fysische hindernissen die het parametergebied van de tokamak inperken, bruikbare oplossingen te vinden. F. Engelmann evalueert de stand van zaken op dit gebied en geeft aan waar nader onderzoek vereist is. In een inleidend artikel introduceert C.M. Braams enkele begrippen uit de tokamak-fysica.

De opsluiting van het thermonucleaire plasma

C.M. Braams

Veldconfiguratie

Een tokamak (*fig. 1*) heeft een axiaal symmetrisch magnetisch veld dat is samengesteld uit een toroïdale component B_t en een poloïdale B_p. Het toroïdale veld omcirkelt de symmetrie-as en wordt geproduceerd met spoelen die in een kring om die as zijn geplaatst (*fig. 2a*). De sterkte varieert met de afstand tot de symmetrie-as volgens R^{-1}. Het poloïdale veld ligt in vlakken door de symmetrie-as en wordt geproduceerd door toroïdale stromen in spoelen (fig. 2*b*), zowel als in het plasma. Het samengestelde veld heeft – bij ongestoord drukevenwicht – krachtlijnen die een stelsel van toroïdale oppervlakken beschrijven. In de eenvoudigste benadering zijn dit oppervlakken met concentrische cirkelvormige doorsneden, zodat het binnenste is gedegenereerd tot een toroïdale as met straal R_0, de 'grote straal' van het stelsel. De kleine straal, r, is dan wat het plasma betreft begrensd binnen $0 < r < a$, als a de kleine straal van het toroïdale vat of de positie van een materieel obstakel (de 'limiter') aanduidt. In het algemeen is echter de poloïdale doorsnede van een magnetisch oppervlak niet cirkelvormig en hebben meer naar binnen of naar buiten gelegen oppervlakken een verschillende grote straal (excentriciteit), dit echter wel met behoud van het topologisch karakter van in elkaar passende (niet snijdende) tori. De doorsnede kan b.v. ovaal, D-vormig, driehoekig, niervormig of sikkelvormig zijn, afhankelijk van stromen in de toroïdale spoelen die mede het poloïdale veld bepalen. De halve breedte, gemeten in de richting van R, van het buitenste (het tegen de limiter aanliggende) magnetische oppervlak wordt dan a genoemd. De vorm van de doorsnede heeft invloed op de stabiliteit van het magnetohydrodynamische evenwicht.

Elk magnetisch oppervlak wordt gekenmerkt door de waarde van q, dat is het aantal malen dat een krachtlijn in de toroïdale richting moet rondlopen om één poloïdale omloop te voltooien:

$$q \equiv (2\pi)^{-1}\oint d\psi = (2\pi)^{-1}\oint (B_t/RB_p)dl, \quad (1)$$

waarin de kringintegraal langs een poloïdale veldlijn wordt genomen en de hoek ψ in de toroïdale richting wordt gemeten. Anders gezegd: q is de spoed van de krachtlijn, gemeten in radialen en genormeerd op 2π (*fig. 3*); q is een maat voor de sterkte van de binnen het desbetreffende oppervlak lopende toroïdale stroom: een sterke stroom betekent een sterk poloïdaal veld, dus een lage waarde van q. Anderzijds geeft

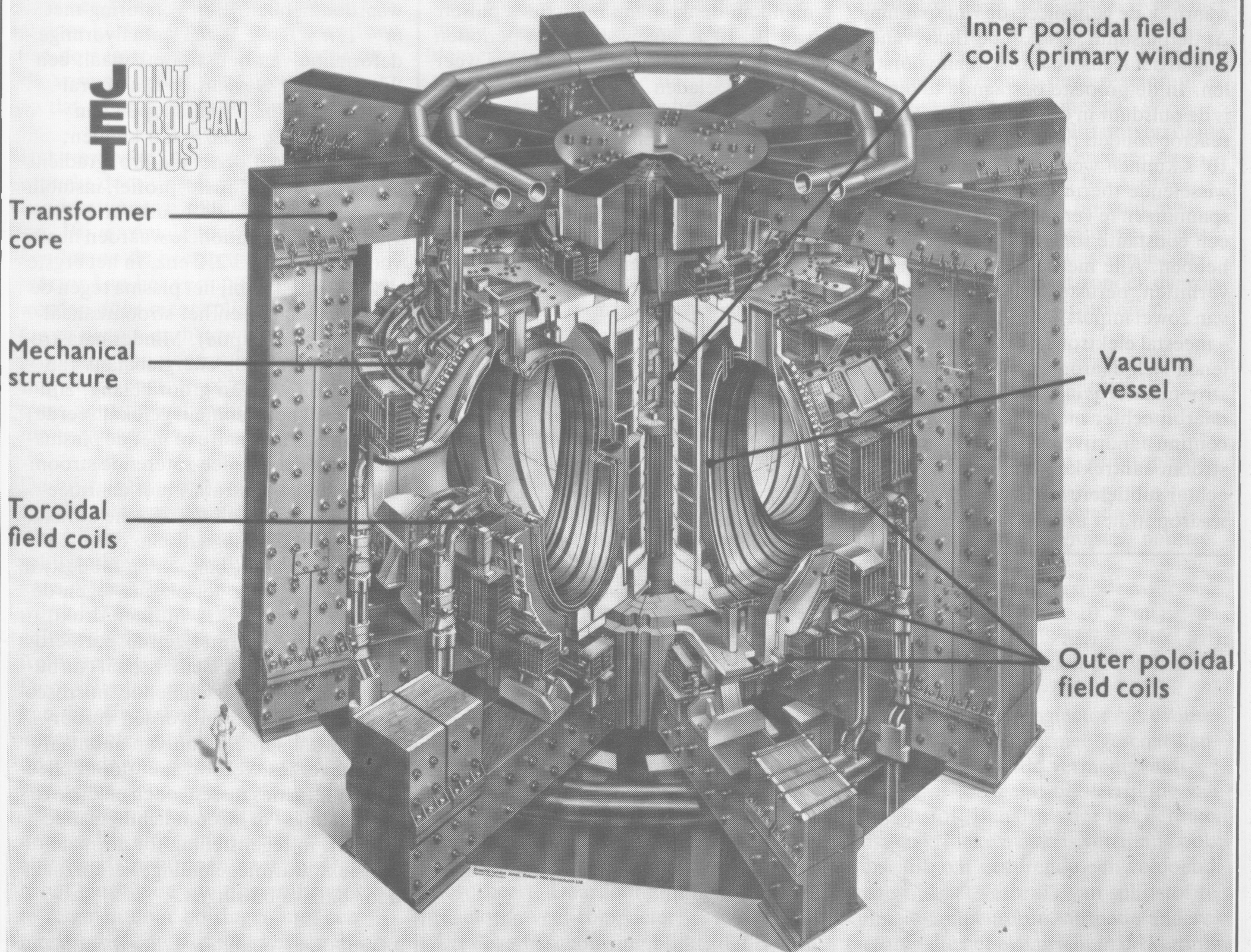


Fig. 1. De Europese tokamak JET (Joint European Torus) in Culham bij Oxford (UK).

een sterk toroïdaal veld een hoge waarde van q. Bij elk stroomdichtheidsprofiel van de toroïdale stroom hoort een q-profiel en omgekeerd. Bij drukevenwicht vallen de magnetische oppervlakken samen met de vlakken van de stroomdichtheidslijnen; ze zijn dan tevens vlakken van gelijke druk en, door de grote mobiliteit van de elektronen langs de krachtlijnen, ten naaste bij vlakken van gelijke dichtheid en temperatuur. In een tokamak met 'ohmse' verhitting door de toroïdale stroom ontstaat onder invloed van dissipatie en warmteverlies een temperatuurprofiel met een maximum op de magnetische as. Daar het elektrisch geleidingsvermogen van de temperatuur afhangt volgens $T^{3/2}$, stelt zich ook een gepiekt stroomdichtheidsprofiel in met een q-profiel dat van een minimum op de as (vaak $q \approx 1$) oploopt naar $q \gtrsim 2$ bij de wand of de limiter. Wegens zijn betekenis voor de stabiliteit van het MHD-evenwicht wordt q de veiligheidsfactor genoemd.

De toroïdale stroom in een tokamak wordt gewoonlijk aangedreven door inductie. De pulsduur is dan beperkt door de relatie

$$V\Delta t = \Delta\phi, \tag{2}$$

waarin V de geïnduceerde ringspanning, Δt de pulsduur, en $\Delta\Phi$ de fluxverandering in het tranformator-circuit voorstellen. In de grootste bestaande tokamaks is de pulsduur in de orde van 10 s; in een reactor zouden pulsen in de orde van 10^4 s kunnen worden geïnduceerd. Om wisselende thermische en mechanische spanningen te vermijden zou men graag een constante toroïdale stroom willen hebben. Alle methoden om plasma te verhitten, berusten op de overdracht van zowel impuls als energie op deeltjes – meestal elektronen – in het plasma en lenen zich daarom in principe ook voor stroomaandrijving. Het rendement is daarbij echter niet hoog genoeg om continu aandrijven van de hele toroïdale stroom aantrekkelijk te maken. Er zijn echter subtielere toepassingen mogelijk, waarop in het artikel van Engelmann wordt ingegaan. Eén daarvan is het 'opladen' van de stroomtransformator, waarmee wordt bedoeld dat de flux in de transformator door een tegenspanning over de primaire wikkeling wordt omgekeerd, terwijl de niet-inductieve aandrijving ervoor zorgt dat de stroom in het plasma in de oorspronkelijke richting doorloopt. Daarna kan de transformator die taak weer overnemen; men kan denken aan inductieve pulsen van 10^3-10^4 s, afgewisseld met perioden van 10^2 s waarin de transformator weer wordt opgeladen.

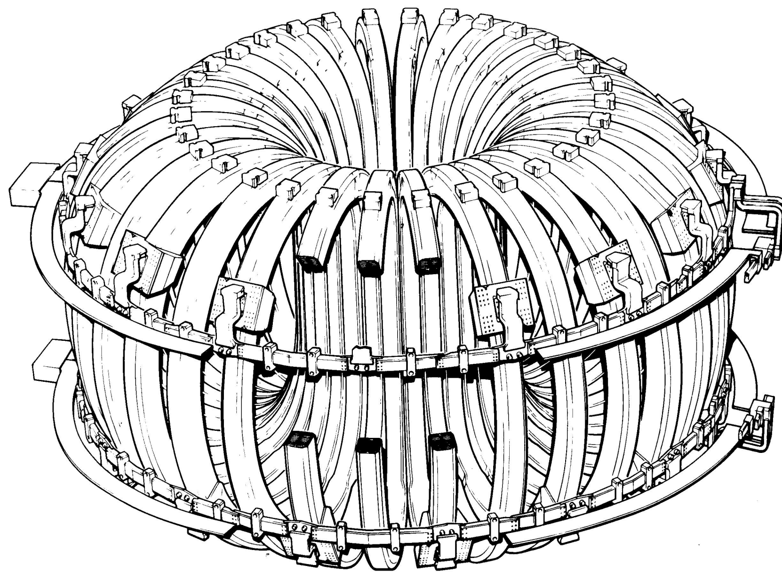


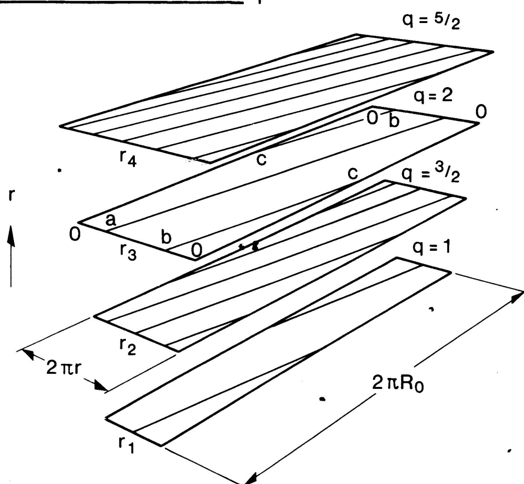
Fig. 2. De spoelen voor het toroïdale veld (a) en het poloïdale veld (b) van JET.

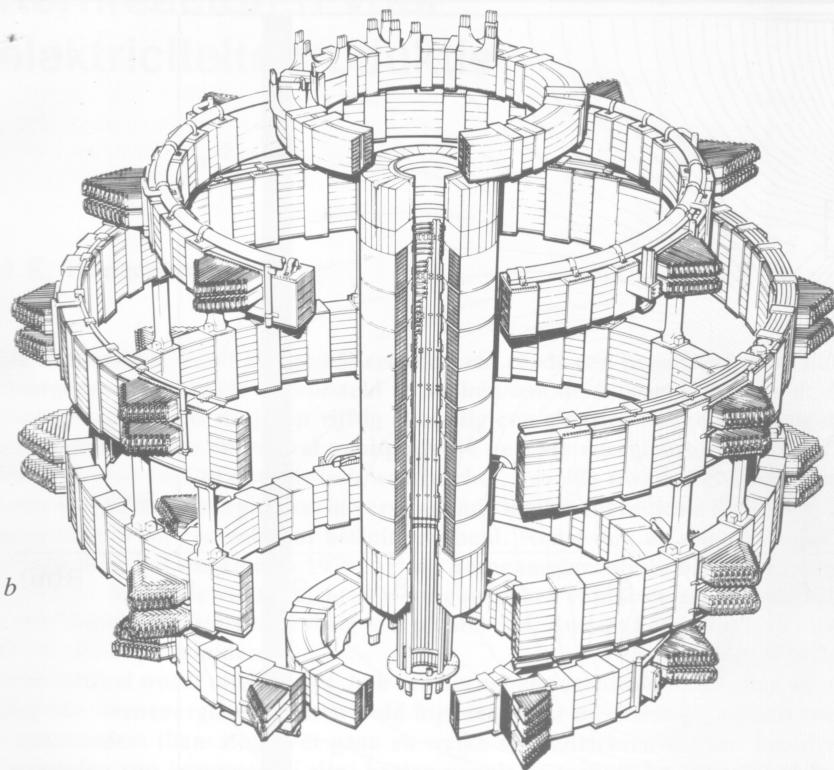
Stabiliteit en warmtetransport

Voor de stabiliteit van het evenwicht tussen de magnetische druk en de gaskinetische druk van het plasma zijn vooral schroefvormige deformaties van de magnetische oppervlakken, gekoppeld aan eveneens schroefvormige stroomdichtheidskanalen, van belang. Deze worden gekenmerkt door een poloïdaal en een toroïdaal mode-getal, resp. m en n. Zulke deformaties kunnen de topologie van de oppervlakken veranderen, b.v. in een 'tearing mode' (*fig. 4*). In tegenstelling tot de q van een krachtlijn kan de genormeerde spoed van een verstoring, m/n, alleen rationele waarden hebben. Een verstoring met $m = 1, n \neq 0$ b.v. is een spiraalvormige deformatie van het stroomkanaal: een 'kink-mode'. Gevaarlijk zijn vooral deformaties die parallel lopen aan krachtlijnen: $q = m/n$. Zo kunnen, afhankelijk van de lokale drukgradiënt en het stroomdichtheidsprofiel, instabiliteiten optreden in de buurt van oppervlakken waar q rationele waarden heeft, vooral bij $q = 1, 3/2, 2$ enz. In het ergste geval wordt daarbij het plasma tegen de wand geslingerd en het stroomkanaal verbroken (disruptie). Minder catastrofaal, maar voor de energiebalans van het plasma wel van groot belang, zijn interne (in het r-domein gelokaliseerde) disrupties, stationaire of met de plasmakolom als geheel mee-roterende stroomdichtheidsconcentraties met daarmee samenhangende, als thermische kortsluiting werkende 'magnetische eilanden' en uitstulpingen ('ballooning modes') in de gebieden waar het plasma tegen de holle kant van de krachtlijnen drukt. Verder wordt warmte getransporteerd door fluctuaties op kleine schaal (turbulentie), die door verschillende 'microscopische' instabiliteiten worden veroorzaakt. Men spreekt dan van anomaal warmteverlies, veroorzaakt door collectieve interacties tussen ionen en elektronen (ladings- of stroomdichtheidsfluctuaties), in tegenstelling tot normale of klassieke warmtegeleiding, veroorzaakt door binaire botsingen.

Magnetische eilanden worden geïllustreerd in fig. 4. Als de daar geschetste

Fig. 3. Vier uitgeslagen magnetische oppervlakken corresponderen met r_1, r_2, r_3 en r_4. De vier hoekpunten van een uitslag stellen het zelfde punt voor. Voor deze voorstelling zijn oppervlakken met rationele q gekozen: $q_1 = 1$; $q_2 = 3/2$; $q_3 = 2$; $q_4 = 5/2$. Per oppervlak is één krachtlijn getekend; bij irrationele waarden van q beschrijft de krachtlijn het gehele oppervlak.





verstoring aangroeit, valt de stroom uiteen in een aantal stroomkanalen ('tearing mode'). Als bij naburige oppervlakken met verschillende q-waarden eilanden ontstaan met verschillende m-getallen, kunnen deze elkaar zo beïnvloeden dat de krachtlijnen geen oppervlakken meer vormen, maar een gebied in de ruimte stochastisch vullen. Dit leidt door de grote mobiliteit van elektronen langs krachtlijnen in het desbetreffende r-interval tot een verhoogde elektronen-warmtetransport-coëfficiënt, dus tot een verlaagde temperatuurgradiënt in het gebied.

Verontreiniging

Om verontreiniging van het plasma door verstoven materiaal van het ontladingsvat tegen te gaan, wordt in veel tokamaks een 'divertor' gebruikt. Dit is een vervorming van de buitenste magnetische oppervlakken waardoor deze een open karakter krijgen, d.w.z. een verbinding maken van het plasma naar de wand. Naar buiten diffunderend plasma dat het singuliere oppervlak (de 'separatrix') passeert, komt via de 'scrape-off layer' in de divertor-kamer (*fig. 5*), waar het tegen de wand recombineert en als gas wordt afgepompt. Een stationair dichtheidsprofiel wordt in stand gehouden door toevoer van gas of door injectie van neutrale deeltjes of brandstofkorrels. Verontreinigingen die van de wand het plasma binnenkomen, worden in de scrape-off-laag geïoniseerd en eveneens langs de krachtlijnen naar de divertor-kamer getransporteerd.

Ook als er niet voorzien is in een speciale divertor-kamer, blijkt het gedrag van het plasma gunstig te worden beïnvloed door een divertor-achtige veldconfiguratie met een singulier oppervlak (in een poloïdaal vlak geprojecteerd: een singuliere krachtlijn met een 'X-point') binnen het ontladingsvat. *Fig. 6* toont een dergelijke 'magnetic limiter'-configuratie, verkregen door asymmetrische bekrachtiging van de spoelen voor het poloïdale veld, waarmee JET goede opsluitingsresultaten heeft bereikt.

Er doet zich overigens in een dergelijke veldconfiguratie een probleem voor met de relatie tussen $q(a)$ en de toroïdale stroom I binnen de separatrix. Uit de definitie (1) blijkt dat q divergeert bij de separatrix, omdat $B_p = 0$ bij het X-punt, zodat $q(a)$ zijn betekenis als maat voor de toelaatbare toroïdale stroom verliest. Als men echter een op q gelijkende grootheid definieert volgens:

$$q_I \equiv (2\pi/\mu_0)B_0k^2a^2/R_0I = 5 \times 10^6\, B_0k^2a^2/R_0I, \tag{3}$$

waarin $B_0 = B_t(R_0)$ en

$$k \equiv (2\pi a)^{-1}\oint dl, \tag{4}$$

blijkt empirisch, uit experimenten en computer-simulaties, dat q_I goed correleert met het stabiliteitsgedrag. De vorm (3) gaat over in (1) voor een cilindrische plasmakolom met $k = 1$ en $B_p = \mu_0 I/2\pi a$, vandaar de naam 'cilindrische q' of 'stroom-q' voor q_I. Ter onderscheiding wordt q volgens de oorspronkelijke definitie, (1), ook q_ψ genoemd.

Fig. 4. Een ($m = 2$, $n = 1$)-modulatie $\delta \boldsymbol{j}$ van de stroomdichtheid in de buurt van een oppervlak $q = 2$. Het bijbehorende poloïdale veld, $\delta \boldsymbol{B}$, gesuperponeerd op het evenwichtsveld van het ongestoorde, axiaal symmetrische $\boldsymbol{j}$-profiel, heeft drie kenmerken: magnetische eilanden bij de maxima van de stroomdichtheid; singuliere krachtlijnen ('X-points' in het poloïdale vlak) bij de minima van de stroomdichtheid; gedeformeerde toroïdale oppervlakken op grotere afstand van de verstoring van $\boldsymbol{j}$.

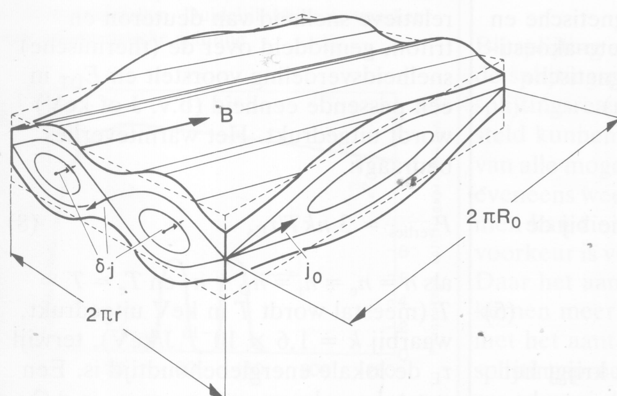


Fig. 5. Een poloïdale divertor.

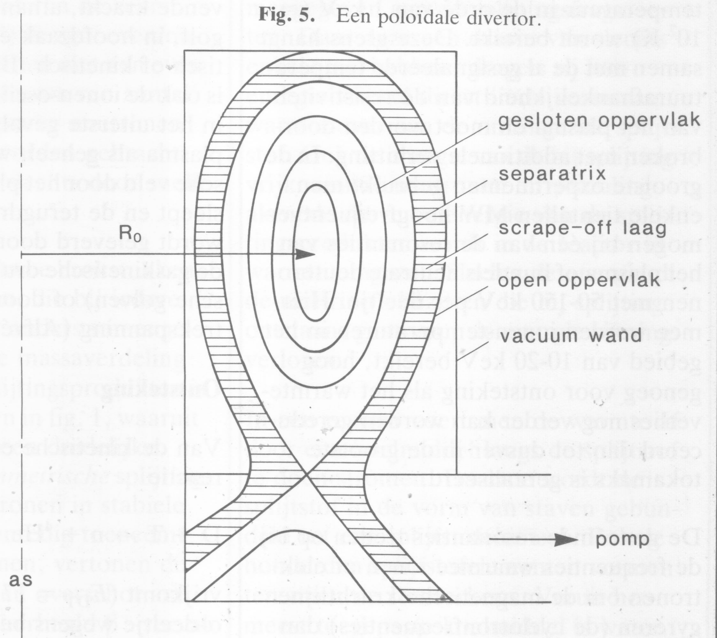


Fig. 6. Het poloïdale veld behorend bij een 'magnetic limiter'-veldconfiguratie in JET.

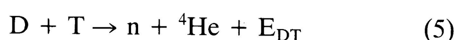
Verhitting

Verhitting van het plasma gebeurt in een tokamak allereerst door de geïnduceerde toroïdale stroom, waarmee een temperatuur in de orde van 1 keV ($\approx 10^7$ K) wordt bereikt. Deze grens hangt samen met de al gesignaleerde temperatuurafhankelijkheid van de resistiviteit van het plasma en moet worden doorbroken met additionele verhitting. In de grootste experimenten gebruikt men enkele tientallen MW hoogfrequentvermogen bij één van de resonanties van het plasma of bundels neutrale deuteronen met 50-150 keV per deeltje. Hiermee worden ionen-temperaturen in het gebied van 10-20 keV bereikt, hoog genoeg voor ontsteking als het warmteverlies nog verder kan worden gereduceerd dan tot dusver in de grootste tokamaks is gerealiseerd.

De genoemde resonanties treden op bij de frequenties waarmee ionen of elektronen om de magnetische krachtlijnen gyreren (de cyclotronfrequenties) dan wel gekoppelde gyraties uitvoeren (de lage hybride-frequentie). Er bestaat een aantal soorten golven in gemagnetiseerd plasma, die zich van elkaar onderscheiden door de hoeken die de golfvector en het oscillerende elektrische veld met het constante magnetische veld maken en door het frequentiegebied. Bij hoge frequenties is alleen de oscillatie van de elektronen van belang en is de terugdrijvende kracht, afhankelijk van het soort golf, in hoofdzaak elektrisch, magnetisch of kinetisch. Bij lagere frequenties is ook de ionen-oscillatie van belang, en in het uiterste geval oscilleert het plasma als geheel, waarbij het magnetische veld door het plasma wordt meegesleept en de terugdrijvende kracht wordt geleverd door de magnetische en de gaskinetische druk (magneto-akoestische golven) of door de magnetische trekspanning (Alfvén-golven).

Ontsteking

Van de kinetische energie die bij de reactie

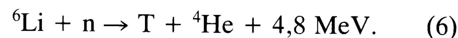


$$D + T \rightarrow n + {}^4He + E_{DT} \qquad (5)$$

vrijkomt (E_{DT} = 17,6 MeV) krijgt het α-deeltje wegens behoud van impuls 20%, dus 3,5 Mev, die voor de warmtehuishouding van het plasma beschikbaar zijn. De andere 14 MeV worden door het neutron naar de tritium-kweekmantel getransporteerd en moeten daaraan als proceswarmte worden onttrokken. Tritium wordt gekweekt met

$$^6Li + n \rightarrow T + {}^4He + 4{,}8 \text{ MeV}. \qquad (6)$$

De specifieke warmte-ontwikkeling in het plasma (de vermogensdichtheid) bedraagt



$$P_\alpha = P_{fus}/5 = n_D n_T \langle \sigma v \rangle E_{DT}/5, \qquad (7)$$

waarin $\langle \sigma v \rangle$ het produkt van de werkzame doorsnede voor de reactie en de relatieve snelheid van deuteron en triton, gemiddeld over de (thermische) snelheidsverdeling voorstelt en E_{DT} in een passende eenheid (b.v. J of keV) wordt uitgedrukt. Het warmteverlies bedraagt:

$$P_{verlies} = 3\, nkT/\tau_E, \qquad (8)$$

als $n = n_e = n_i = n_D + n_T$ en $T_e = T_i = T$ (meestal wordt T in keV uitgedrukt, waarbij $k = 1{,}6 \times 10^{-16}$ J/keV), terwijl τ_E de lokale energiebehoudtijd is. Een ontstoken plasma met $n_D = n_T = n_i/2$ werkt volgens (7) en (8) met

$$n\tau_E = CT/\langle\sigma v\rangle \ , \qquad (9)$$

waarin C tevens profielfactoren bevat indien n, T en τ_E niet worden gedefinieerd als lokale, maar als gemiddelde grootheden.

Om economische redenen wordt gezocht naar een optimale verbrandingstemperatuur, waarbij (7) een maximum heeft. Omdat n niet willekeurig gevarieerd kan worden, maar meestal beperkt wordt door een drukgrens, dus een grens aan nT, schrijft men (7) in de vorm:

$$P_\alpha = n^2T^2 \frac{\langle\sigma v\rangle}{T^2} \frac{E_{DT}}{20} \qquad (10)$$

Hieruit blijkt dat de optimale verbrandingstemperatuur ligt in het gebied waar $f(T) \equiv \langle\sigma v\rangle/T^2$ een breed maximum heeft, dat is bij $T \approx$ 10-20 keV. Tevens blijkt dat in dat zelfde temperatuurgebied de ontsteekconditie (9) of elk ander criterium voor de verhouding tussen P_{fus} en $P_{verlies}$, wordt uitgedrukt als een eis aan het produkt $n\tau_E T$. Met name voor een ontstoken plasma geldt:

$$nT\tau_E = cT^2/\langle\sigma v\rangle \ , \qquad (11)$$

en wel (met bepaalde veronderstellingen t.a.v. temperatuur- en dichtheidsprofielen):

$$n_0T_0\tau_E \approx 60 \ ; \ T_0 \approx 20 \text{ keV}, \qquad (11a)$$

als n_0 de centrale dichtheid in 10^{20} m^{-3}, T_0 de centrale temperatuur in keV en τ_E de globale energiebehoudtijd in seconden voorstellen.

In de grote tokamaks, TFTR in Princeton en JET in Culham, heeft het 'fusieprodukt' $nT\tau_E$ in de eenheden van (11) in 1986 de waarde 2 bereikt. Met verbeteringen die nog worden aangebracht, hoopt men in de buurt van 10 te komen. Dan zou, als met een deuteriumtritiummengsel wordt gewerkt, al een belangrijke bijdrage tot de energiehuishouding worden geleverd door de α-deeltjes en zou het belangrijkste doel van deze experimenten worden bereikt. De schaalvergroting die dan nog nodig is om tot reactorcondities te komen, lijkt – in vergelijking met de weg die in 30 jaar fusie-onderzoek al is afgelegd – wel te overzien, al wegen ook hier de laatste loodjes budgetair het zwaarst. En, zoals blijkt uit het artikel van Engelmann, staan de schaalwetten voor de energiebehoudtijd nog niet zo goed vast dat men nu al een ontwerp voor een reactor op tafel kan leggen waarvan men zeker weet dat het niet net iets te klein is of juist veel groter dan nodig. Maar nu zowel TFTR als JET ontladingen met, weliswaar kortstondige, 'goede opsluiting' kunnen produceren, is er goede hoop dat verdere experimenten in deze opstellingen een stevige fysische grondslag zullen leggen voor het ontwerp van opstellingen van de volgende generatie, de testreactoren, waarmee de fusietechnologie tot ontwikkeling kan komen.

De status van de tokamak-fysica

F. Engelmann*

Dit artikel geeft een overzicht van de status van de tokamak-fysica op de gebieden die de fusie-opbrengst van het plasma bepalen: de operationele grenzen en de plasma-energiebehoudtijd. Operationele grenzen treden op ten gevolge van de aanwezigheid van bovengrenzen aan de 'plasma-beta' (d.i. de verhouding van de kinetische druk van het plasma en de magnetische druk van het opsluitende magnetische veld) en de plasmadichtheid, en van een ondergrens aan de zgn. veiligheidsfactor. Dit artikel steunt in hoge mate op het werk dat verricht is voor en door de INTOR Workshops [1,2]. Voor een verklaring van enkele gebruikte begrippen en notaties wordt verwezen naar het artikel van C.M. Braams.

Operationele grenzen

In het artikel van Braams is aangetoond dat de fusie-vermogensdichtheid schaalt als

$$P_{fus} \sim \beta^2B^4f(T). \qquad (1)$$

De optimale verbrandingstemperatuur is die waarbij de functie $f(T)$ een maximum heeft:

$$T_{opt} \approx 10 \text{ keV}. \qquad (2)$$

Gezien de technologische beperkingen aan B leidt een grens aan β tot een bovengrens aan P_{fus}. Deze grens is echter alleen toegankelijk indien bij een dichtheid kan worden gewerkt waar β_{max} wordt bereikt bij T_{opt}, dat is bij een dichtheid

$$n_{opt} = \beta_{max} B^2/4\mu_0kT_{opt}. \qquad (3)$$

Een grens in de plasmadichtheid die lager is dan n_{opt}, zal leiden tot een vermindering van het bereikbare fusievermogen. Aangezien de operationele grenzen aan plasma-beta en dichtheid in tokamaks minder beperkend lijken wanneer de ontlading wordt bedreven bij een lagere veiligheidsfactor q (zie de hoofdstukken: plasma-beta en plasmadichtheid), is ook de ondergrens van q van belang.

De dichtheidslimiet, of via (3) een beta-limiet, heeft ook direct invloed op de opsluitingseigenschappen van het plasma, die worden uitgedrukt door de opsluitparameter $n\tau_E$, waarbij τ_E de globale energiebehoudtijd voorstelt.

De 'plasma-beta'

Talrijke tokamak-experimenten, die met elkaar een groot parametergebied bestrijken, hebben tot de conclusie geleid dat er voor de plasma-beta een operationele grens bestaat die op de volgende wijze afhangt van de ontladingsparameters[1,2,3]:

$$\beta_{max}(\%) = CI(\text{MA})/a(\text{m})B(\text{T}). \qquad (4)$$

Hierin is I de plasmastroom, a de kleine straal van het plasma en C een constante waarvoor geldt:

$$2{,}8 \leqslant C \leqslant 3{,}5. \qquad (5)$$

Een andere vorm van vergelijking (4) is (zie Braams):

$$\beta_{max}(\%) = 5C \frac{a}{R} \frac{k^2}{q_l} \ , \qquad (6)$$

waar R de straal van het plasma vertegenwoordigt, $k = \oint dl/2\pi a$ een factor is die bepaald wordt door de vorm van de poloïdale doorsnede van het buitenste gesloten magnetische oppervlak en q_l de veiligheidsfactor in de cilindrische benadering is (ook genoemd de 'stroom-q'). Uit de resultaten van de duitse tokamak ASDEX, die een tijdafhankelijkheid van de beta-grens vertonen, wordt afgeleid dat C afhangt van het stroomdichtheidsprofiel $j(r)$. Brede

* Dit artikel stoelt op een bijdrage aan het Symposium of Fusion Technology (SOFT), Avignon, 8-12 september 1986, door F. Engelmann en K. Borrass en is bewerkt door C.M. Braams en J. Rem.

$j(r)$-profielen worden geassocieerd met een kleinere C, een tendentie die ook is af te leiden uit een stabiliteitsananlyse van de ideale MHD ballooning modes. (Ideale magneto-hydrodynamica is een theorie waarin het plasma als een ideale geleider wordt beschouwd.)

De experimentele beta-grenzen zijn in het algemeen in overeenstemming met de stabiliteitsanalyses van de ideale MHD; de theoretische resultaten van de stabiliteitsgrenzen van zowel de ideale ballooning modes als de kink modes geven eveneens de schaling (4) met als waarde voor C

$$3 < C < 4 \,, \qquad (7)$$

voor geoptimaliseerde profielen [2,3,4].

Experimenteel manifesteert de beta-grens zich in het optreden van disrupties ('harde' grens) of in een verslechtering van de opsluiting ('zachte' grens). Het verschil is nog niet verklaard.

Een waarde van $C \approx 3{,}5$ lijkt voor reactortoepassingen voldoende, mits $q_I \approx 2$ toegankelijk is (zie hieronder). Ten einde zo'n waarde van C te handhaven kan profielbeheersing van de stroom noodzakelijk zijn. Het bedrijven van een ontlading dichtbij een 'zachte' beta-grens zou een eenvoudige manier kunnen zijn om de verbrandingtemperatuur te beheersen en te voorkomen dat T stijgt tot boven de optimale waarde van (2).

Plasmadichtheid en veiligheidsfactor

Het gedrag van alle tokamak-plasma's in de nabijheid van de bovengrens van de plasmadichtheid vertoont grote overeenkomst, maar tussen de experimenten onderling zijn grote verschillen in de waarde van deze grens. Een algemeen geaccepteerde verklaring voor het verschijnsel is nog niet beschikbaar [2,3]. In het algemeen wordt de dichtheidsgrens geanalyseerd in termen van de parameter van Murakami-Hugill:

$$M \equiv 10^{-19}\, n_e(\mathrm{m}^{-3}) R(\mathrm{m}) / B(\mathrm{T}). \qquad (8)$$

Hierin is n_e de gemiddelde elektronendichtheid van het plasma. De maximale bereikbare waarde van deze parameter, M_{max}, wordt gewoonlijk geschreven in de vorm [1,2,3]

$$M_{max} = g/q. \qquad (9)$$

De coëfficiënt g
- is, tenminste in 'Ohms' verhitte plasma's, ongeveer een constante voor $q > 3$[2];
- wordt kleiner voor kleine gehele waarden van q, speciaal voor $q \approx 2$[2];
- wordt kleiner met toenemende verontreiniging van het plasma[1,2,3];
- wordt groter met toenemend verhittingsvermogen[1,2,3]; en
- wordt groter voor meer 'gepiekte' dichtheidsprofielen zoals worden opgewekt door injectie van brandstofkorrels ('pellets').

De waarde van g varieert veelal met het verhittingsvermogen W volgens $W^{1/2}$; in ontladingen met extra verhitting schijnt g ook afhankelijk van B te zijn.

De hoogste waarde van M die tot nu toe is bereikt, bedraagt 17. Deze waarde werd bereikt in de tokamak DOUBLET-III in San Diego, in een ontlading met titanium-'gettering' en met neutralebundelverhitting bij $q \approx 2$.

Een waarde van $q = 2$ aan de rand van het plasma is zo ongeveer de ondergrens van de veiligheidsfactor die in een tokamak kan worden bereikt[2,3,4] – speciale gevallen waarbij het plasma is omgeven door een goed geleidende wand, buiten beschouwing gelaten. De hoogste waarden van M worden gewoonlijk bereikt in de nabijheid van $q = 2$, zoals wordt gesuggereerd door de schaling (9).

De waarschijnlijkheid van een disruptie wordt groot wanneer de ontlading in de nabijheid van de dichtheidsgrens en van de grens in de veiligheidsfactor bedreven wordt. In het bijzonder voor plasma's met een aanzienlijke verontreiniging en bij niet te kleine waarden van q kan de dichtheidsgrens gerelateerd worden aan het gelijk worden van de stralingsverliezen aan het verhittingsvermogen. Verschijnselen die hiermee gepaard kunnen gaan of afzonderlijk kunnen optreden, zijn poloïdale asymmetrieën in de plasmarandlaag, waarschijnlijk veroorzaakt door een thermische instabiliteit, en het loskomen van de hete plasmakolom van de 'limiter'. Een beëindiging van een ontlading door een disruptie wordt voorafgegaan door een sterke MHD-activiteit aan de rand van het plasma waarbij de tearing mode $m = 2$ dominant is, althans bij lage waarden van q.

Een waarde voor $M_{max} > 20$ zou voldoende zijn voor reactortoepassingen in de zin dat onder deze omstandigheden $n_{max} > n_{opt}$ zou volgen uit vergelijking (3) indien $q \approx 2$. Een ondergrens aan q bij $q_{min} \approx 2$ is acceptabel.

Disrupties

Wanneer een ontlading bij een operationele grens een disruptie ondergaat, gaat de thermische energie van het plasma snel verloren, b.v. in 0,2 ms. Deze fase wordt gevolgd door één waarin de stroom wat langzamer afneemt (in enkele tientallen ms of meer[1,2]). In grote opstellingen leidt dit tot het optreden van hoge warmtepulsen op componenten die direct met het plasma in aanraking zijn of die straling en/of deeltjes uit het plasma opvangen. Verder ondervinden alle in het vacuümvat geplaatste componenten sterke elektrische velden en grote elektromechanische krachten.

Vaak speelt de 'tearing' mode $m = 2$ een essentiële rol in 'harde' disrupties. Deze mode kan worden beïnvloed door profielbeheersing, d.w.z. door lokale verhitting en door niet-inductieve stroomaandrijving in de nabijheid van het magnetische oppervlak met $q = 2$[2,5].

'Harde' disrupties moeten worden vermeden in een reactor. Dit houdt in dat reactoren niet kunnen werken in de nabijheid van een met een disruptie samenhangende grens. Vandaar dat de mogelijkheid om 'harde' disrupties te vermijden door beheersing van de $m = 2$-mode onderzocht dient te worden.

Opsluiting

De kennis van de opsluitingseigenschappen van een tokamak-plasma maakt momenteel een snelle ontwikkeling door. Een definitief beeld is nog niet beschikbaar. De volgende vijf tendenties kunnen worden gesignaleerd[2]:

1. Bij matige hoge waarden van de dichtheid en van q wordt in 'Ohms' verhitte ontladingen de globale energiebehoudtijd redelijk beschreven door de op onderzoek met de tokamak ALCATOR van het MIT gebaseerde neo-ALCATOR schaalwet

$$\tau_E(s) = 0{,}07 n (10^{20}\ \mathrm{m}^{-3}) a(\mathrm{m}) R^2(\mathrm{m}) q. \qquad (10)$$

Naarmate de waarde van de dichtheid n hoger wordt, wordt de afhankelijkheid van n zwakker. Dit kan worden tegengegaan door het dichtheidsprofiel te laten oppieken door injectie van brandstofkorrels. Klaarblijkelijk maakt dit een alternatieve plasmatoestand mogelijk met andere opsluitingseigenschappen.

2. In ontladingen met een hoog vermogen W aan extra verhitting wordt τ_E (afgezien van de a- en R-afhankelijkheid) beter weergegeven door de schaalwet:

$$\tau_E \sim n^0 I f(W) A_i^{1/2}, \qquad (11)$$

waar A_i het plasma-ionenmassagetal is en waar hetzij

$$f(W) \sim W^{-1/2}\,,$$

of $\qquad (12)$

$$f(W) \sim 1 + c/W.$$

Toepassing van extra verhitting leidt dus tot een meer of minder sterke afname

van de opsluiting in vergelijking met een Ohms-verhit plasma, behalve voor zeer lage plasmadichtheden ($< 10^{19}$ m^{-3}). τ_E vertoont geen duidelijke afhankelijkheid van de verhittingsmethode (injectie van neutrale bundels of RF verhitting bij verschillende frequenties). Er worden echter wel verschillende opsluitingsregimes gevonden, in het bijzonder:

- Het 'lage' opsluitings- of L-gebied, dat optreedt in 'normale' limiter-ontladingen en in divertor-ontladingen met een laag verhittingsvermogen en/óf een hoog stralingsvermogen van de plasmarand.
- Het 'hoge' opsluitings- of H-gebied[6], dat gevonden wordt in divertorontladingen bij grote verhittingsvermogens en dat gekarakteriseerd wordt door een hoge randtemperatuur en een breed temperatuurprofiel.
- Een ander gebied met verbeterde opsluitingseigenschappen dat gevonden wordt in een limiter-ontlading waarin het dichtheidsprofiel gepiekt is en de 'recycling' van plasma via recombinatie aan de wand en her-ionisatie van gas in het plasma laag wordt gehouden.

Om een echte divertor-ontlading met lage 'recycling' en dus een hoge temperatuur aan de rand van het plasma te verkrijgen, is een vrije 'plasma scrape-off'-laag van voldoende dikte (enkele cm) buiten de separatrix vereist.

3. Warmtegeleidingsverliezen worden overheerst door de elektronen, behalve in ontladingen met hoge dichtheid en niet al te hoge temperatuur, waar de warmteverliezen van de ionen belangrijk worden.

4. De elektronenwarmtegeleiding is verhoudingsgewijs laag in het centrale gebied van de ontlading waar de magnetische afschuiving klein is, behalve gedurende een 'zaagtandval' ('interne disruptie'). Dientengevolge kunnen in dit gebied sterk gepiekte temperatuurprofielen worden verkregen door centrale verhitting. Het zaagtandverschijnsel, dat optreedt wanneer er een $q = 1$-oppervlak in het plasma is, leidt tot een periodieke afvlakking van het temperatuurprofiel (en het dichtheidsprofiel). De zaagtanden kunnen worden beïnvloed door gebruik te maken van niet-inductieve stroomaandrijving (zie het volgende hoofdstuk) – op deze wijze wordt voorkomen dat een magnetisch oppervlak met $q = 1$ optreedt – of door lokale verhitting en/of stroomaandrijving rond het $q=1$-oppervlak[2].

5. Het temperatuurprofiel van de elektronen kan moeilijk worden veranderd in het buitengebied van de ontlading ('profielconsistentie'); dat geldt speciaal voor grote tokamaks en boven bepaalde verhittingsvermogens[3].

Op grond van de huidige kennis van de opsluitingseigenschappen van een tokamak-plasma is het nog niet mogelijk een simpele extrapolatie naar ontstekingscondities te maken. Hiervoor zijn niet alleen experimenten in grote tokamaks bij hogere verhittingsvermogens nodig, maar tevens een beter begrip van de verschillende ontladingsregimes en de transportmechanismen die daarin voorkomen. In het bijzonder moet de rol van profieleffecten en de onderlinge afhankelijkheid van verschillende profielen, het belang van de toestand van de rand van het plasma (temperatuur, dichtheid, afschuiving), de wijze waarop het verhittingsvermogen of de vermogensdichtheid van de verhitting de opsluiting beïnvloedt, en de invloed van de afmetingen van het plasma worden verduidelijkt. Het lijkt waarschijnlijk dat stroom- en/of dichtheidsbeheersing in enigerlei vorm nodig zal zijn voor het bereiken van ontsteking.

Niet-inductieve stroomaandrijving

De belangstelling voor niet-inductieve stroomaandrijving kwam oorspronkelijk voort uit de verwachting dat daarmee een stationaire tokamak-ontlading mogelijk zou zijn. Niet-inductieve aandrijving van de stroom in een tokamak is inderdaad mogelijk gebleken. De hoofdzakelijk toegepaste methoden zijn tot dusver injectie van neutrale bundels en het gebruik van golven bij de lage hybride-frequentie[1,2]. In verschillende experimenten zijn met behulp van lage hybride golven aanzienlijke stromen gedreven, en kort geleden is men op TFTR en JET daarin geslaagd met behulp van neutrale bundels. Andere methoden van niet-inductieve stroomaandrijving waarvan het onderzoek in een beginstadium verkeert, zijn toepassing van snelle magnetosonische golven, elektron-cyclotrongolven en Alfvén-golven.

Niet-inductieve stroomaandrijving wordt gebruikt voor een aantal verschillende doeleinden, namelijk aandrijving van een stationaire stroom, beheersing van het stroomprofiel ter beïnvloeding van het MHD-gedrag, hulp bij het ontstaan van het eerste plasma en in de aangroeifase van de stroom, en het opladen van de transformator[1,2]. Al deze functies van niet-inductieve stroomaandrijving zijn van potentieel belang voor een reactor. Het is heel goed mogelijk dat voor beheersing van het stroomprofiel en beïnvloeding van het MHD-gedrag niet-inductieve stroomaandrijving zelfs essentieel zal blijken te zijn. Een betere kwantificering van de vereiste vermogens voor deze toepassingen is dan ook van belang. Stroomtoename en het opladen van de transformator bij lage dichtheden vereisen betrekkelijk weinig vermogen. Om na te gaan welke toepassingen zinvol en technisch haalbaar zijn, moet verder onderzoek worden uitgevoerd.

* * *

De fysica van tokamaks gaat gestadig vooruit. In grote tokamaks in het bijzonder wordt een parametergebied bestreken dat reikt tot in de nabijheid van de reactor. Er is echter verder intensief onderzoek vereist om de condities te kunnen voorspellen waaronder een reactor optimaal zal werken. De meest kritieke problemen op weg naar een tokamak-reactor zijn, van practisch standpunt uit bezien, het opsluiten van een plasma bij reactortemperaturen en het voorkomen dat disrupties optreden.

Ten einde verder vooruitgang te boeken, is het van het grootste belang onze kennis en ons begrip omtrent de transportgebieden en -mechanismen in tokamaks uit te breiden. Meer inzicht in de rol van profielen (plasmastroom, dichtheid en temperatuur) en hun onderlinge afhankelijkheden met betrekking tot de invloed op de operationele grenzen en de opsluiting is vereist. Alleen op zo'n basis zal het mogelijk zijn de keuze van reactorparameters te optimaliseren en een consistent en geoptimaliseerd scenario voor het doen functioneren van een reactor te ontwikkelen.

Dit onderzoek werd verricht in het kader van het associatiecontract van Euratom en FOM met financiële steun van ZWO en Euratom.

Referenties

1. European contributions to the INTOR Workshop, Phase Two-A, Part II, Commission of the European Communities, Report EUR-FU-BRU/XII-268/85/EDV I (1985).
2. INTOR Workshop, Report on Phase Two, Part II, IAEA, Vienna, STI/PUB/714 (1986).
3. Report on the 4th European Tokamak Programme Workshop, Copenhagen, 4-6 December 1985; Plasma Phys. and Contr. Fusion **28** (1986) 1173.
4. J.P. Goedbloed et al., Proc. 12th European Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Budapest, 2-6 September 1985, Vol. I, p. 54.
5. FOM ECRH Team and TFR Group, 12th European Conf. on Contr. Fusion and Plasma Physics, Budapest, 2-6 September 1985, Vol. II, p. 60.
6. F. Wagner et al., Phys. Rev. Lett. **49** (1982) 1408.

Veiligheids- en milieuaspecten van kernfusie

H.Th. Klippel

Inleiding

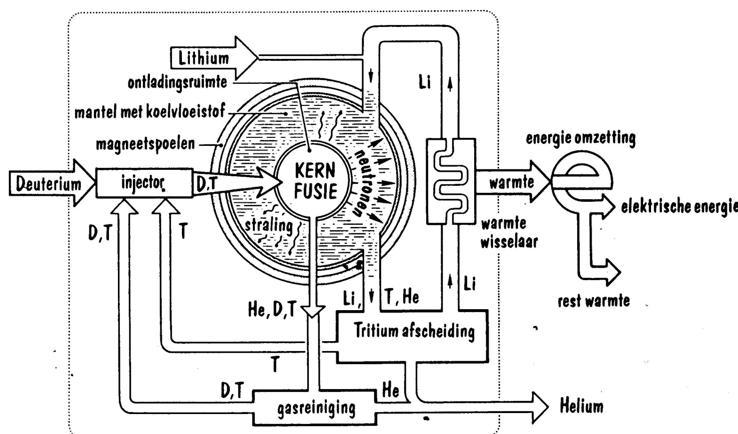
Kernfusie wordt gezien als een aantrekkelijke optie voor de toekomstige produktie van energie. In vergelijking tot andere energiebronnen, b.v. kernsplijting en kolen, kan kernfusie een aantal maatschappelijk aantrekkelijke kenmerken hebben, die de hoge kosten van het fusieonderzoek verantwoord maken:

- Er vindt geen uitstoot plaats van CO_2, SO_2, NO_2 en andere schadelijke chemische afvalstoffen.
- De brandstofvoorziening is nagenoeg onuitputtelijk en de fusiereactor legt ook in ander opzicht geen overmatig beslag op schaarse grondstoffen.
- Onder normale omstandigheden zal slechts zeer weinig radioactiviteit in het milieu terechtkomen.
- Er is geen ongeval denkbaar waardoor het maatschappelijk leven rond de centrale ontwricht wordt.

Op basis van bestaande studies[1-5] zullen in dit artikel de belangrijkste veiligheids- en milieuaspecten van de fusiereactor worden toegelicht. Daarbij wordt, om de gedachten te concretiseren, verwezen naar een denkbeeldige reactor die behoort tot de eerste generatie fusiereactoren met een vermogen van ca. 1000 MWe en die is gebaseerd op het tokamak-principe met deuterium en tritium als brandstof. Hierbij wordt uitgegaan van de huidige stand van de technologie met eventuele plausibele extrapolaties naar het beschouwde reactorniveau, te realiseren in de nabije toekomst.

Ter afsluiting van deze inleiding en voorafgaand aan de paragrafen over milieu en veiligheid volgen hier eerst nog enkele opmerkingen over andere maatschappelijke aspecten van kernfusie. Voor de op zijn vroegst in de eerste helft van de volgende eeuw (rond 2030) mogelijk te realiseren eerste generatie fusiereactoren komt alleen de energieopwekking uit de deuterium-tritiumreactie in aanmerking. De brandstof deuterium is overvloedig aanwezig en gemakkelijk winbaar uit gewoon water. Het benodigde tritium wordt binnen het reactorsysteem zelf gekweekt uit de neutronenreactie met lithium. Ook lithium is mondiaal in zeer ruime mate aanwezig, het is makkelijk winbaar uit zoutafzettingen die goed zijn om meer dan 1000 jaar enkele duizenden energiecentrales van brandstof te voorzien en is in nog veel grotere hoeveelheid winbaar uit zeewater. De brandstofvoorziening maakt daarbij slechts een zeer klein deel uit van de totale kosten van de elektriciteitsproduktie. De belangrijkste elementen van een fusiereactor zijn geschetst in *fig. 1.*

Fig. 1. Schematische voorstelling van een fusiereactor. In de hier geschetste versie circuleert lithium (als vloeibaar metaal of zout) om zowel warmte als tritium te bestemder plaatse te bezorgen. In andere versies wordt daarvoor een ander transportmiddel gebruikt, b.v. helium.



Het nucleaire deel van een fusiereactor verschilt sterk van dat van een splijtingsreactor, zowel qua principe en componenten als qua brandstofvoorziening. Bij de fusiereactor wordt de brandstof continu toegeleverd (ca. 600 g/dag voor een 1000MWe-centrale) en de torus bevat op elk moment slechts ca. 1 gram aan brandend D-T-mengsel.

Een fusiereactor zal een zeer complex geheel worden, met toepassing van hoogwaardige materialen die bestand zijn tegen straling, en van geavanceerde, veelal nog te ontwikkelen, systeemcomponenten (grote supergeleidende magneten, tritiumsystemen, kweekmantelsegmenten, robots enz.). Uit kostenstudies blijkt dat de installatiekosten van de fusiereactor weliswaar hoger zullen zijn dan die van een splijtingsreactor van vergelijkbaar vermogen, maar dat dank zij de zeer geringe brandstofkosten de totale kosten van de geproduceerde elektrische stroom niet veel hoger hoeven te zijn dan die bij splijtingsreactoren of andere grootschalige energieopwekkers.

Van het onderzoek aan fusiereactoren van het hier beschouwde magnetische type zijn geen militaire toepassingen bekend. Dit geldt niet voor een andere benadering, waarbij de fusiereacties plaatsvinden in kleine explosies, maar die buiten het kader van dit artikel valt.

De radioactieve inventaris van een fusiereactor

Potentiële bronnen van radiologisch risico worden gevormd door de brandstof en de reactieprodukten van het D-T-fusieproces. Er zijn schonere fusieprocessen denkbaar, b.v. de reactie $p + {}^{11}B \rightarrow 3\,{}^{4}He$, maar eventuele toepassing daarvan ligt in een verdere toekomst. Tritium is het radioactieve isotoop van waterstof ($T = {}^{3}H$) en de bij de reactie vrijkomende neutronen induceren radioactiviteit in de diverse constructiematerialen, waardoor radioactieve corrosieprodukten kunnen vrijkomen. De problemen en risico's verbonden aan tritium en radioactief constructiemateriaal vormen dan ook de hoofdmoot van studies omtrent veiligheids- en milieuaspecten. De toepassing van sterke magneetvelden, elektrische hoogspanning, het gebruik van Li-verbindingen e.d. vormen bronnen van veel geringer risico, die in dit artikel niet verder worden behandeld.

Tritium is een zachte β-straler, maar gezien de grote hoeveelheid ervan in het reactorsysteem en de vluchtigheid moet men toch de uiterste voorzichtigheid betrachten. De fysische halveringstijd van tritium is 12,3 jaar en de specifieke

activiteit bedraagt 370 TBq/g (= 10 kCi/g). De effecten van tritium zijn goed bekend.

De radiotoxiciteit van tritium is sterk afhankelijk van de chemische vorm. Gasvormig tritium (T_2 of HT) wordt vrijwel niet opgenomen in het lichaam, maar oxideert in de lucht en in de grond tot getritiëerd water (HTO of T_2O). In de geoxideerde vorm wordt tritium gemakkelijk opgenomen in het menselijk weefsel. De radiotoxiciteit van getritiëerd water is dan ook ca. 25 000 maal zo hoog als die van gasvormig tritium.

De biologische halveringstijd van in het lichaam opgenomen tritium bedraagt ca. 10 dagen en er zijn geen aanwijzingen dat in de voedselketen concentratie van tritium optreedt. In berekeningen van het risico van tritium voor de mens wordt meestal de (conservatieve) benadering gekozen waarbij men uitgaat van de meest ongunstige vorm van tritiumopname (als HTO). De hoeveelheid tritium in een fusiereactor is sterk afhankelijk van ontwerpkeuzen, tritiumverwerking en accumulatie in materialen. De schattingen lopen uiteen van in totaal enige kg tot enkele tientallen kg. Minimalisatie van de tritiuminventaris is dan ook een belangrijk technologisch onderzoekthema.

In de recent uitgevoerde Europese evaluaties[1,2] wordt voor de eerste generatie fusiereactoren een tritiuminventaris van 3 kg haalbaar geacht. Slechts 1 gram hiervan is in zeer mobiele vorm in het plasma aanwezig; ca 1 kg is als brandstofvoorraad, eventueel chemisch gebonden, en in kleinere porties in gescheiden ruimten buiten het reactorgebouw opgeslagen. De hoeveelheid tritium geabsorbeerd in de kweekmantel en in de brandstofkringloop, bedraagt 0,2 tot 2 kg. Het meeste tritium is weinig mobiel en heeft een lage waarschijnlijkheid tot ontsnapping naar de omgeving.

De hoeveelheid door de neutronen geïnduceerde radioactiviteit is sterk afhankelijk van de samenstelling van de gebruikte materialen. Bij toepassing van normaal roestvast staal (AISI316) bedraagt de totale hoeveelheid geïnduceerde radioactiviteit in de fusiereactor $3{,}3 \times 10^8$ TBq /GWe (9×10^9 Ci/GWe). Meer dan 90% van de radioactiviteit wordt gevormd in de eerste wand en in het constructiemateriaal van de kweekmantel.

Deze hoeveelheid radioactiviteit is weliswaar groot en in de eerste jaren na het stopzetten van de fusiereactor vergelijkbaar met de radioactiviteit van splijtingsprodukten en transuranen in een splijtingsreactor van vergelijkbaar vermogen; de gezamenlijke radiotoxiciteit van de produkten is echter 1 à 2 orden van grootte kleiner dan die van de splijtingsprodukten en transuranen. Bovendien neemt na verloop van 10 jaar na stopzetten van de fusiereactor de radioactiviteit (en radiotoxiciteit) sneller af dan bij de langlevende splijtingsprodukten van de splijtingsreactor. Verder zijn de produkten nauwelijks vluchtig of oplosbaar in water.

Een belangrijk ontwikkelingspotentieel bij fusie ligt in de verdere reductie van de hoeveelheid radioactiviteit door gebruik van materialen bestaande uit elementen die minder geactiveerd worden onder neutronenbestraling en ook sneller vervallen. Bekend zijn de vanadiumlegeringen (b.v. V-15Cr-5Ti), die bij toepassing als constructiemateriaal 10 tot 100 maal minder sterk radioactief worden dan roestvast staal. Andere potentiële materialen zijn b.v. aluminium en grafiet. In het materialenonderzoek van het Europese fusieprogramma wordt dan ook aan deze nieuwe materialen ruime aandacht besteed.

Lozingen bij normaal bedrijf

Enige lek van tritium uit de reactor tijdens normaal functioneren is onvermijdelijk. Bedrijfservaring met bestaande installaties, zoals bij de Canadese CANDU splijtingsreactoren[6], en met speciaal gebouwde[7] of nog te bouwen proefinstallaties[8] zal moeten leiden tot verdere optimalisatie van de tritiumcyclus en tot beperking van de mogelijke tritiumlozing in de atmosfeer.

Het principe van 'compartimentering' en 'multiple containment' van het tritiumsysteem speelt hierbij een essentiële rol. Dit principe houdt in dat het gehele tritiumsysteem is verdeeld in zoveel mogelijk onderling goed gescheiden subsystemen, elk in een goed gecontroleerde en op een tritiumzuiveringssysteem aangesloten gasdichte ruimte. Het gasdichte reactorgebouw vormt de veiligheidsomhulling en is de laatste barrière tegen het vrijkomen van tritium in de buitenwereld.

De grootste tritiumlekken tijdens normaal bedrijf zullen naar verwachting veroorzaakt worden door permeatie via de koelleidingen, door onderhoud aan de koelsystemen en de plasmakamer en door het verwisselen van kweekmantelmodulen. Op grond van ervaringen met de Canadese splijtingsreactoren van het type CANDU met vergelijkbare tritiumconcentratie in het koelmiddel wordt geschat dat met de huidige technologie de hoeveelheid tritium die via het ventilatiesysteem naar de atmosfeer wordt geloosd, beperkt kan blijven tot ruwweg 0,01 g/d (= 3,7 TBq/d = 100 Ci/d). De lozing naar de omgeving vindt bij de hier beschouwde referentiereactor plaats via een ca. 100 m. hoge schoorsteen. Tritiumlozing via het afvalwater wordt geschat op ca. 150 GBq/d (= 4 Ci/d).

Lekken van het koelsysteem tijdens bedrijf en tijdens onderhoud zijn ook de hoofdoorzaak van verlies aan radioactieve corrosieprodukten. Op basis van ervaringen bij splijtingsreactoren wordt aangenomen dat deze hoeveelheid gering zal zijn (ca. 10 l/d). Dit leidt tot een geschatte lozing van ca. 0,2 TBq/j (= 5 Ci/j) via het afvalwater en van ca. 20 GBq/j (= 0,5 Ci/j) via het ventilatiesysteem.

Uitgaande van een lozing waarbij al het tritium verondersteld wordt vrij te komen in de radiotoxisch meest ongunstige vorm (dus als HTO of T_2O), is de maximale stralingsdosis voor de meest blootgestelde bewoner in de directe nabijheid van de centrale 0,015 mSv/j (= 1,5 mrem/j). (Ca. 50% is afkomstig van de atmosferische lozing van HTO, ca. 25% van de atmosferische lozing van activeringsprodukten en ca. 25% van de afvalwaterstroom).

De, conservatief geschatte, stralingsbelasting van 1,5 mrem/j is slechts 1% van de dosis, afkomstig van de natuurlijke achtergrondstraling, en is zelfs kleiner dan de variatie in de achtergrondstraling binnen Nederland. Wanneer in de wereld 2000 fusiereactoren in werking zouden zijn, zal bij gelijke uitstoot van bovengenoemde hoeveelheden, de gemiddelde stralingsdosis voor elk individu minder dan 0,001 mSv/j (= 0,1 mrem/jaar) bedragen.

Opslag van radioactief afval

De levensduur van de aan directe neutronenstraling blootgestelde onderdelen, het reactorvat en de kweekmantel, is bij gebruik van de thans bekende constructiematerialen onder vollastcondities beperkt tot ca. 5 jaar. Bij een fusiereactor zullen dan ook tijdens de 1 of 2 maal per jaar plaatsvindende reactorstops, naast het normale onderhoud, gedeelten van de kweekmantel verwisseld moeten worden. Een goede toegankelijkheid tot de kweekmantel, met het oog op snelle verwisseling of reparatie van reactoronderdelen met behulp van grote geavanceerde robots, en een goede stralingsbescherming van het bedienend personeel behoren daarmee tot de essentiële ontwerpeisen van toekomstige fusiereactoren. Het volume aan radioactief afval dat jaarlijks op deze manier geproduceerd zal worden, bedraagt 10 tot 100 m^3 voor een

1000 MWe-centrale.

Zoals eerder is opgemerkt, verloopt het radioactieve verval betrekkelijk snel (de dominante halveringstijden belopen 1 tot 100 jaar), bevat het afval geen of nauwelijks oplosbare stoffen en is de radiotoxiciteit relatief gering. Bij gebruik van materialen met lagere geïnduceerde activiteit en sneller verval kunnen de afvalbehandeling en opslag verder vereenvoudigd worden. Actieve koeling van het definitief opgeslagen afval is dan niet meer nodig en bovendien behoort hergebruik van het materiaal na een relatief korte 'afkoeltijd' (enkele tientallen jaren) tot de potentiële mogelijkheden (voor grafiet is dit zelfs binnen één jaar).

Veiligheid en ongevallen

Veiligheid is van essentiëel belang bij de introductie van een nieuwe energiebron. Ondanks zijn complexiteit heeft de fusiereactor de volgende intrinsieke (passieve) veiligheidskenmerken die hem onderscheiden van o.a. splijtingsreactoren:

- Onder geen enkele omstandigheid kan het vermogen uit de hand lopen tot ver boven de ontwerpwaarde.
- Elke verandering van de bedrijfscondities leidt tot instabiliteit van de plasmaopsluiting en beëindigt het fusieproces.
- De hoeveelheid brandstof in de plasmatorus (ca. 1 gram) is slechts voldoende voor hooguit enkele minuten brandduur.
- De hoeveelheid geïnduceerde radioactiviteit is niet inherent gebonden aan het fusieproces, maar is afhankelijk van de materiaalkeuze; er is een belangrijk ontwikkelingspotentieel voor toepassing van nieuwe materialen met zeer lage radioactiviteit.
- De hoeveelheid vervalwarmte die vrijkomt bij radioactief verval is relatief gering (ca. 2% van het nominaal vermogen), en na stopzetten van de reactor is de vermogensdichtheid van de 'nawarmte' zo gering dat bij eventueel wegvallen van alle actieve koeling falen van de constructie waarschijnlijk voorkomen kan worden.
- Bij voortgezette ontwikkeling en aangepast ontwerp wordt een volledig passief systeem haalbaar geacht.
- De brandstofcyclus is vrijwel volledig een intern gebeuren; er is geen externe opwerkingsfabriek met bijbehorende logistieke consequenties nodig.

Ongevallen binnen de centrale met bedrijfseconomische consequenties en gezondheidsrisico's voor het personeel kunnen niet worden uitgesloten.
Uit de veiligheidsevaluaties voor fusiereactoren blijkt echter dat zelfs onder de ernstigst denkbare ongevallen geen groot gevaar voor de omgeving optreedt. In ieder geval is er geen sprake van een ramp waarbij zo ingrijpende maatregelen nodig zijn dat het normale leven in de omgeving van de centrale wordt verstoord.
Als ernstigst denkbare ongevallen worden gebeurtenissen gezien die veroorzaakt worden door wegvallen van de koeling in de kweekmantel, falen van magneetconstructies en explosies of branden, verbonden aan het gebruik van waterstof, grafiet en Li-verbindingen.

Er is onderzoek verricht naar de gevolgen van een hypothetisch ongeval waarbij door interne of externe oorzaken de reactoromhulling faalt en een hoeveelheid tritium en ander radioactief materiaal wordt vrijgemaakt, die daarna in het milieu terechtkomt.
De studies wijzen uit dat bij de meeste ongevallen het vrijkomen van tritium een groter gevaar vormt dan dat van geactiveerde constructiematerialen. Uitgaande van een zorgvuldig ontwerp met geïsoleerde en gescheiden opstellingen van de diverse tritiumsystemen wordt aangenomen dat bij het ernstigst denkbare ongeval niet meer dan 200 g tritium vrijkomt in het milieu; de gepubliceerde veiligheidsstudies hebben geen mechanismen aan het licht gebracht waardoor meer dan een paar gram radioactief constructiemateriaal in het milieu vrijkomt.

Bij een hypothetische lozing van 200 g tritium (in zijn meest ongunstige vorm van getritiëerd water HTO) vanuit een verondersteld opening in het dak (op 20 m hoogte) zal onder de slechtste weersomstandigheden op een afstand van ca. 1 km van de centrale een maximale stralingsdosis optreden van 60-80 mSv (6-8 rem).
Deze (conservatief berekende) stralingsdosis is weliswaar niet verwaarloosbaar, maar vormt geen direct gevaar voor de bewoners in de nabije omgeving van de centrale. Gezien de aanbevolen normen voor maatregelen na abnormale ongevallen in kerncentrales (variërende van 50 tot 150 mSv (5-15 rem)) zijn ingrijpende maatregelen, zoals evacuatie, niet nodig.

Samenvattend mag gesteld worden dat met kernfusie een energiebron in het vooruitzicht wordt gesteld die voor het milieu en de gezondheid van de mensen zeer aanvaardbaar is. De milieubelasting is laag, zowel in normaal bedrijf als na onwaarschijnlijke, zeer ernstige ongevallen.

Referenties

1. R. Bünde et al., Environmental Impact and Economic Prospects of Nuclear Fusion, Report of the Commission of European Communities. EURFU-BRU/XII-828/86, november 1986.
2. G. Casini, C. Ponti, P. Rocco (ed.), Environmental Aspects of Fusion Reactors, CEC, Joint Research Centre, Ispra. Technical note 1.04.B1.85.156, december 1985.
3. J.B. Cannon (ed.), Background Information and Technical Bases for Assessment of Environmental Implications of Magnetic Fusion Energy, U.S. Department of Energy/Oak Ridge National Laboratory report DOE/ER-0170, augustus 1983.
4. M.S. Kazimi, Safety Aspects of Fusion, Review paper, Nuclear Fusion **24** (1984) 1461.
5. Fusion Safety Status Report, Technical document IAEA-TECDOC-388, IAEA Wenen, oktober 1986.
6. T.S. Drolet, K.Y. Wong, P.J. Dinner, Canadian Experience with Tritium — The Basis of a New Fusion Project, Nuclear Technology/Fusion **5** (1984) 17.
7. J.L. Anderson, The Status of Tritium Technology Development for magnetic Fusion Energy, Nuclear Technology/Fusion **4** (1983) 75.
8. Fusion Technology and Safety, Programme Progress Reports Joint Research Centre, Ispra.

Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde - A

Aan: Geadresseerde
Betreft: Themanummer "Kernenergie"

Redactiesecretariaat

Amsterdam, 8 juli 1987

L.S.,

Het op 14 juli a.s. verschijnende zomernummer van het Nederlands Tijdschrift voor Natuurkunde-A zal -één jaar na Tsjernobyl- gewijd zijn aan het thema "Kernenergie". Gezien de aard van ons tijdschrift, een der organen van de Nederlandse Natuurkundige Vereniging, ligt het accent op de natuurkunde, en wel in het bijzonder op recente Nederlandse bijdragen daaraan. Naast de puur fysische/technische bijdragen bevat het nummer zeven bijdragen aan de rubriek "Opinie", van fysici die van de redactie de vraag voorgelegd kregen: Wat dunkt U van de *toekomst* van de kernenergie?

Gezien de aard van uw functie meenden wij dat u voor dit nummer belangstelling zou kunnen hebben, reden waarom wij u hierbij een present-exemplaar doen toekomen.

Indien u prijs stelt op regelmatige toezending van het NTvN, kunt u dit kenbaar maken aan het bureau van de NNV, postbus 5451, 1007 AL Amsterdam, tel. 020-739777 (vanaf ongeveer 1 augustus 020-5738808), alwaar men u ook alle gewenste inlichtingen kan geven.

Namens de redactie

F.W. Sluijter
voorzitter

J.W. Miltenburg
secretaris

een uitgave van de
Nederlandse Natuurkundige Vereniging

NNV

Thema van NTvN-A53 no. 4: 'Wijsgerige' fysica